

# **Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen**

## **- Experimentelle und theoretische Untersuchungen -**

Vom Fachbereich für Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Dipl.-Ing. Holger Friedrich Rolf Schüttrumpf

aus Seesen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Helmig
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. W. Mertens
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. K. Kordina
Eingereicht am:	4. Dezember 2000
Mündliche Prüfung am:	5. Februar 2001

2001

Die nachstehende Arbeit ist veröffentlicht

- als elektronische Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,  
<http://www.tu-bs.de>
- in den Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau  
der Technischen Universität Braunschweig, Heft 149, 2001

## **Vorwort von Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci**

Angesichts der Unsicherheiten bei der Vorhersage der regionalen Folgen von Klimaänderungen sowie aufgrund der Stochastik der vielfältigen Einflußfaktoren und deren Wechselwirkungen wird es bei allem Fortschritt auch in der Zukunft keine sicheren Prognosen und keine absolute Sicherheit gegen Sturmfluten geben. Auch wenn es gelingt, die für die Bemessung relevanten extremen Sturmflutwasserstände besser zu erfassen, so wird es niemals auszuschließen sein, daß diese Bemessungsereignisse innerhalb der Lebensdauer des Bauwerkes überschritten werden. Damit ist die Frage nach der höchsten Sturmflut und ausreichender Kronenhöhe nicht mehr so relevant gegenüber der Frage nach dem Bau von Schutzwerken, die gegen Wellenüberlauf bruch sicher sind. Das heißt, die Gewährleistung einer schadlosen Abführung des Überlaufwassers wird zur prioritären Aufgabe bei der Planung neuer und der Sicherung bestehender Seedeiche. Um jedoch die Erosionsgefährdung der Binnenböschung durch Wellenüberlauf abschätzen und Gegenmaßnahmen optimieren zu können, reicht die Kenntnis der mittleren Wellenüberlauf rate, wie sie durch die bisherigen Berechnungsansätze bestimmt wird, nicht aus. Vielmehr sind weitere Strömungsgrößen wie die Geschwindigkeiten und die Schichtdicken des Überlaufschwalls maßgebend.

In diesem Zusammenhang ist es Herrn Schüttrumpf erstmalig gelungen, detaillierte experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Beschreibung des Strömungsfeldes zum Wellenüberlauf von Seedeichen durchzuführen und physikalisch fundierte Ansätze für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten und Schichtdicken des Wellenüberlaufs über Deichaußenböschung, Deichkrone und Deichbinnenböschung zu entwickeln.

Obwohl Kapitel 4 den Hauptteil der Arbeit darstellt, sind auch einige Aspekte aus den anderen vorbereitenden Kapiteln besonders hervorzuheben, so z. B. die beeindruckende Wissensstandanalyse und die daraus gezogenen Schlüsse im Kapitel 2, den theoretischen Beitrag zu den Maßstabeffekten sowie die neuen Methoden zur Aufbereitung und Auswertung der gemessenen Strömungsgrößen im Kapitel 3. Neben der zweckmäßigen Verknüpfung zwischen Theorie und Experiment stellt das systematische Vorgehen in fünf logischen Schritten die zweite methodische Säule des Hauptteils der Arbeit dar. In fast jedem dieser fünf Schritte ist es Herrn Schüttrumpf gelungen, neue Berechnungsansätze zu entwickeln, so z. B. für die Brechvorgänge am Deich, für den Wellenauf- und Wellenablauf, für die Wellenüberlaufströmung auf der Deichkrone sowie für die Wellenüberlaufströmung auf der Deichbinnenböschung und die mittleren Überlauf rates. Der wichtigste und originellste Beitrag des Verfassers bleibt jedoch die Entwicklung und experimentelle Verifizierung seiner neuen theoretischen Ansätze zur Beschreibung der Wellenüberlaufströmung auf Deichkrone und Deichbinnenböschung, da er hier völliges Neuland betreten hat. Äußerst hilfreich ist der Abschluß des Hauptkapitels der Arbeit durch ein Beispiel, das die praktische Anwendung der neu entwickelten Ansätze illustriert.

Abschließend hofft der Unterzeichnende, daß die meisten der hier entwickelten Ansätze und Methoden nicht nur als Ausgangsbasis für die weitere Forschung dienen werden, sondern auch sehr bald in die Bemessungspraxis umgesetzt werden.

Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci  
Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig  
Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen

Braunschweig, Februar 2001

## **Foreword from Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci**

An absolute safety of coastal flood defences is not achievable, due to the uncertainties associated with the prediction of the local effects of global climate changes as well as to the stochastic nature of the numerous influencing parameters and their interaction. Even if considerable improvements in the prediction of extreme water levels will be made, one can never exclude that such extreme events will occur within the lifetime of the defence structures. Subsequently, the question about the highest design water level and the sufficient crest height of the defence structures becomes less important than the question on how to construct structures which can resist overtopping flow without breaching. Therefore, the priority task in the design of new structures and the safety assessment of existing structures is shifting towards the development of appropriate methods to help avoiding any serious failure caused by excessive overtopping flow. To properly assess the related damage potential and to optimize the associated counter-measures, reliable tools are needed for the prediction of the wave overtopping flow field. In fact, the existing formulae yield only average overtopping rates which are inappropriate for stability analysis.

With this background the doctoral thesis by Mr. Schüttrumpf represents a unique contribution to wave overtopping research. In fact, it is the first time that comprehensive experimental and theoretical investigations are performed on the flow field associated with wave overtopping, including the development of physically sound formulae to predict flow velocities and layer thicknesses on the seaward slope, on the crest and on the inner slope of a sea dike.

Although Chapter 4 constitutes the main part of the thesis, in which the new formulae for the description of the wave overtopping flow are developed and verified, further important contributions in the preparatory Chapters 2 and 3 are noteworthy. These include the impressive analysis of the current knowledge in Chapter 2, as well as the theoretical developments on scale effects and the new analysis methods in Chapter 3. Beside the synergetic combination of theory and experiments, the systematic approach in five steps adopted in Chapter 4 represents the second methodological highlight of the thesis. Moreover, it should be stressed, that almost each of these five steps includes a set of new formulae, e. g. for breaking criteria at the sea dike, for wave run-up and run-down, for wave overtopping flow parameters, as well as for average overtopping rates. However, the set of new formulae for flow velocity and layer thickness associated with wave overtopping on the seaward slope, the crest and the inner slope of a sea dike still represents the major contribution of the entire thesis. Very helpful are also the example calculations provided at the end of Chapter 4 to illustrate the application of the new formulae.

Finally, it is hoped that most of the results of this thesis will not only build starting basis for further research on wave overtopping modelling, but will also find very soon their way into the design practice.

Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci  
Leichtweiss-Institute for Hydraulic Engineering, TU Braunschweig  
Dept. of Hydromechanics and Coastal Engineering

Braunschweig, February 2001



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent in der Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci für die Möglichkeit dieses Forschungsthema zu bearbeiten, seine ständige Unterstützung und die Freiheiten bei der Durchführung der verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekte.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Helmig für die Übernahme des Koreferats sowie Prof. Dr.-Ing. W. Mertens als Berichtler danken. Mein Dank gilt auch Prof. K. Kordina, der kurzfristig als Vorsitzender der Prüfungskommission eingesprungen ist.

Bedanken möchte ich mich aber auch bei Dr.-Ing. H. H. Dette, der mich am Leichtweiß-Institut eingestellt hat und mir damit den Weg zur Promotion eröffnete.

Besonders möchte ich mich aber bei Frau Dipl.-Ing. J. Möller für die unermüdliche Unterstützung während vieler Jahre bei den Versuchen, der Datenauswertung und bei der Erstellung der eigentlichen Arbeit bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen Dipl.-Ing. M. Bleck und Dipl.-Ing. T. Droste sowie bei meinen ehemaligen Hiwis Dipl.-Ing. M. Polschinski, Dipl.-Ing. W. Sauer, Dipl.-Ing. K. Stelljes und cand.inf. K. Piehozki für die Hilfe bei den Modellversuchen und bei der Datenauswertung. Mein Dank gilt aber auch Herrn R. Kvapil für die Vorbereitung und den Einsatz der Meßgeräte sowie Herrn M. Thiel und Herrn H. Appeltauer für den Aufbau des Modells. Bei allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen möchte ich mich für die vielfältige Unterstützung bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt aber meiner Frau Annika und meinem Sohn Timo für ihr Verständnis und ihre Geduld insbesondere an den zahlreichen Wochenenden, die ich im Institut verbracht habe.

Holger Schüttrumpf



# **Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen**

## **- Experimentelle und theoretische Untersuchungen -**



von:

Dipl.-Ing. Holger Schüttrumpf

## Kurzfassung

Für die Bemessung von Seedeichen ist die Kenntnis des Wellenüberlaufes von besonderer Bedeutung. Wellenüberlauf kann aufgrund der stochastischen Natur des Seegangs und der Unsicherheiten bei der Festlegung des Bemessungswasserstandes nicht vollständig ausgeschlossen werden und hat in der Vergangenheit zu schweren Deichschäden geführt. Die Kenntnis mittlerer Wellenüberlauftaten, d.h. die gegenwärtige Bemessungspraxis, reicht für die Bemessung der Binnenböschung von Seedeichen jedoch nicht aus, vielmehr sind es die Geschwindigkeiten und Schichtdicken des Wellenüberlaufschwells, die für die Infiltration und Erosion des überlaufenden Wassers in die Deichbinnenböschung verantwortlich sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, die Geschwindigkeiten und Schichtdicken des Wellenüberlaufes auf Deichaußenböschung, Deichkrone und Deichbinnenböschung als Funktion der Wellen- und Bauwerksparameter anhand theoretischer Ansätze und experimenteller Untersuchungen zu beschreiben.

In diesem Zusammenhang wurden Modellversuche mit *regelmäßigen Wellen* und *Wellenspektren* an typischen Deichprofilen für verschiedene Freibordhöhen im Wellenkanal durchgeführt. Da kleinmaßstäbliche Modellversuche aufgrund von Maßstabeffekten nur bedingt auf die Natur übertragbar sind, wurden theoretische Betrachtungen hinsichtlich des Einflusses von Viskosität und Oberflächenspannung auf die vorliegenden Modellversuche durchgeführt. Es wurde gezeigt, daß die vorliegenden Untersuchungen nicht signifikant von Maßstabeffekten beeinflußt werden und somit auf den Naturmaßstab übertragbar sind.

Da der Wellenüberlauf von den physikalischen Prozessen beim Wellenbrechen und beim Wellenauflauf auf der Deichaußenböschung abhängt, wurden diese Prozesse zuerst untersucht. Hier wurden der Brechertyp, die Brechwassertiefe, die Wellenauflaufhöhe, die Wellenablaufhöhe und der Auftreffpunkt der brechenden Wellen auf die Böschung analysiert und empirische Ansätze hergeleitet.

Schwerpunkt der Arbeit ist jedoch die Bestimmung der Schichtdicken und Geschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung, der Deichkrone und der Deichbinnenböschung. Es wurde gezeigt, daß die Entwicklung der Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung eng mit der Wellenauflaufhöhe verknüpft ist. Für die Deichkrone wurde ein einfacher empirischer Ansatz zur Beschreibung der Schichtdicken und eine theoretische Näherungslösung für die Überlaufgeschwindigkeiten entwickelt. Auf der Deichbinnenböschung wurden Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten auf der Grundlage eines theoretischen Ansatzes beschrieben, der auf der allgemeinen Bewegungsgleichung und der Kontinuitätsgleichung aufbaut. Alle Ansätze konnten anhand der vorliegenden Modellergebnisse verifiziert werden.

## **Abstract**

Wave overtopping is one of the most important processes for the design of seadikes which was responsible for many severe dike failures in the past. Wave overtopping can not be avoided due to the random nature of the waves and the uncertainties associated with the determination of the design water level. The present design on wave overtopping is based on average overtopping rates. Nevertheless, average overtopping rates are not sufficient for the design of seadikes, because overtopping velocities and overtopping layer thicknesses are required to assess the infiltration and erosion on the landward side of seadikes by overtopping water.

The objective of the present thesis is the determination of the velocities and layer thicknesses on the seaward slope, the dike crest and the landward slope as a function of the relevant wave and dike parameters by means of theoretical and experimental investigations.

Small scale model tests have been carried out in a wave flume with typical dike profiles by using regular waves and wave spectra. Small scale model tests are influenced by scale effects and the transfer of the results to nature might be affected. Therefore, theoretical investigations on the influence of viscosity and surface tension on the model results are performed. It can be concluded that the results of the present study are not significantly influenced by scale effects and can be transferred to prototype scale.

Wave overtopping is dependent on the processes associated to wave breaking and wave run-up on the seaward slope. Therefore, these processes are investigated first. Breaker type, breaking water depth, wave run-up height, wave run-down and the impact point of the breaking wave on the seaward slope are determined and described by means of empirical equations.

The main part of this thesis is the determination of layer thicknesses and velocities on the seaward slope, the dike crest and the landward slope. Layer thickness and wave run-up velocities on the seaward slope are closely connected to the wave run-up height. Empirical formulae for layer thicknesses and a theoretical approach for overtopping velocities are derived for the dike crest. Overtopping velocities and layer thicknesses on the landward slope are derived on the basis of the two-dimensional momentum equation and the continuity equation. All derived formulae are calibrated by model tests with regular waves and verified by model tests with wave spectra.

# Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Fundamental hydrodynamic processes and state of the art .....	6
2.1	Definition of terms and relevant processes for wave overtopping .....	6
2.2	Wave transformation and wave breaking on the seaward slope .....	9
2.2.1	Wave breaking and breaker type .....	9
2.2.2	Summary and critical evaluation .....	12
2.3	Wave run-up .....	13
2.3.1	Wave run-up velocities .....	13
2.3.2	Layer thicknesses of wave run-up .....	16
2.3.3	Summary and critical evaluation .....	17
2.4	Wave overtopping .....	19
2.4.1	Empirical models .....	19
2.4.2	Models based on the weir formula .....	23
2.4.3	Models based on the wave run-up volume .....	24
2.4.4	Numerical models .....	25
2.4.5	Summary and critical evaluation .....	28
2.5	Improvement of the objective and methodology .....	29
2.5.1	Definition of the area of investigation .....	29
2.5.2	Improvement of the objective and methodology .....	32
3.	Experimental investigations .....	35
3.1	Notes on scale effects	
3.1.1	Influence of surface tension .....	36
3.1.2	Influence of viscosity .....	38
3.1.3	Discussion and critical evaluation of scale effects .....	41

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	1
2.	Hydrodynamische Grundlagen und Wissensstand .....	6
2.1	Begriffsbestimmung und relevante Prozesse für den Wellenüberlauf .....	6
2.2	Wellentransformation und Brechvorgang auf der Deichaußenböschung ....	9
2.2.1	Brechverhalten und Brechertyp .....	9
2.2.2	Zusammenfassung und kritische Bewertung .....	12
2.3	Wellenauflauf .....	13
2.3.1	Geschwindigkeiten des Wellenaufaufschwalls .....	13
2.3.2	Schichtdicken des Wellenaufaufschwalls .....	16
2.3.3	Zusammenfassung und kritische Bewertung .....	17
2.4	Wellenüberlauf .....	19
2.4.1	Empirische Verfahren .....	19
2.4.2	Berechnungsansätze auf der Grundlage der Wehrformel .....	23
2.4.3	Indirekte Berechnungsansätze aus dem „Wellenaufaufkeil“ .....	24
2.4.4	Numerische Modelle .....	25
2.4.5	Zusammenfassung und kritische Bewertung .....	28
2.5	Präzisierung der Zielsetzung und Methodik .....	29
2.5.1	Abgrenzung der Thematik .....	29
2.5.2	Präzisierung der Zielsetzung und Methodik .....	32
3.	Experimentelle Untersuchungen .....	35
3.1	Anmerkungen zu Maßstabseffekten .....	35
3.1.1	Einfluß der Oberflächenspannung .....	36
3.1.2	Einfluß der kinematischen Viskosität .....	38
3.1.3	Diskussion und kritische Bewertung der Maßstabseffekte für die vorliegenden Untersuchungen .....	41

3.2	Notes on the transfer of the results to prototype conditions	41
3.3	Model set-up, measurement technique, test programme and test methodology	43
3.3.1	Model set-up	43
3.3.2	Measurement technique	43
3.3.3	Test programme and test methodology	46
3.4	Data preparation and data analysis	48
4.	Presentation and discussion of results	54
4.1	Wave parameters at dike toe	55
4.1.1	Definition of wave parameters at dike toe	55
4.1.2	Presentation of wave parameters at dike toe	55
4.1.3	Summary and evaluation of results	57
4.2	Wave breaking	57
4.2.1	Breaker types	57
4.2.2	Point of wave breaking	60
4.2.3	Impact point of breaking wave on seaward slope	62
4.2.4	Summary and evaluation of results	63
4.3	Processes on seaward slope	65
4.3.1	Wave run-up height	65
4.3.2	Wave run-down height	68
4.3.3	Velocity field on seaward slope	70
4.3.3.1	Layer thicknesses on seaward slope	71
4.3.3.2	Wave run-up velocities on seaward slope	76
4.3.4	Summary and evaluation of results	78
4.4	Velocity field on dike crest	80
4.4.1	Layer thicknesses on dike crest	81
4.4.2	Velocities on dike crest	84
4.4.2.1	Theoretical solution	84
4.4.2.2	Influence of layer thickness and friction factor on velocities on the dike crest	87
4.4.2.3	Experimental results for overtopping velocities on the dike crest	88
4.4.3	Summary and evaluation of results	90
4.5	Velocity field on the landward slope	92



3.2	Anmerkungen zur Übertragbarkeit auf Naturverhältnisse .....	41
3.3	Modellaufbau, Meßtechnik, Versuchsprogramm und -methodik .....	43
3.3.1	Modellaufbau .....	43
3.3.2	Meßtechnik .....	43
3.3.3	Versuchsprogramm und -methodik .....	46
3.4	Datenaufbereitung und -analyse .....	48
4.	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse .....	54
4.1	Wellenparameter am Deichfuß .....	55
4.1.1	Definition der Wellenparameter am Deichfuß .....	55
4.1.2	Darstellung der Wellenparameter am Deichfuß .....	55
4.1.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....	57
4.2	Brechverhalten .....	57
4.2.1	Brechertypen .....	57
4.2.2	Brechpunkt .....	60
4.2.3	Auftreffpunkt der brechenden Wellen auf die Deichaußenböschung	62
4.2.4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....	63
4.3	Prozesse auf der Deichaußenböschung .....	65
4.3.1	Wellenauflaufhöhe .....	65
4.3.2	Wellenablaufhöhe .....	68
4.3.3	Strömungsfeld auf der Deichaußenböschung .....	70
4.3.3.1	Schichtdicken auf der Deichaußenböschung .....	71
4.3.3.2	Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung .....	76
4.3.4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....	78
4.4	Strömungsfeld auf der Deichkrone .....	80
4.4.1	Schichtdicken auf der Deichkrone .....	81
4.4.2	Geschwindigkeiten auf der Deichkrone .....	84
4.4.2.1	Theoretische Herleitung .....	84
4.4.2.2	Einfluß von Schichtdicke und des Reibungsbeiwertes auf die Geschwindigkeiten auf der Deichkrone .....	87
4.4.2.3	Experimentelle Ergebnisse zu den Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichkrone .....	88
4.4.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....	90
4.5	Strömungsfeld auf der Deichbinnenböschung .....	92

4.5.1	New models for average overtopping velocities .....	93
4.5.2	Theoretical approaches for velocities and layer thicknesses of wave overtopping on the landward slope .....	100
4.5.2.1	Theoretical solution .....	100
4.5.2.2	Sensitivity analysis for velocity field on the landward slope .....	102
4.5.2.3	Determination of friction factor $f$ .....	105
4.5.2.4	Application of theoretical solution for average over- topping velocities and average layer thicknesses ..	106
4.5.2.5	Layer thicknesses on landward slope .....	107
4.5.3	Summary and evaluation of results .....	110
4.6	Example .....	112
5.	Summary, conclusions and recommendations for further research .....	115
5.1	Summary of main results .....	115
5.2	Recommendations for further research .....	118
6.	References .....	119
7.	List of symbols .....	124

## Annexes

4.5.1	Neue Ansätze für mittlere Wellenüberlaufzeiten	93
4.5.2	Theoretische Ansätze für Geschwindigkeit und Schichtdicke des Überlaufschwall auf der Deichbinnenböschung	100
4.5.2.1	Allgemeine Herleitung	100
4.5.2.2	Sensitivitätsanalyse für das Strömungsfeld auf der Deichbinnenböschung	102
4.5.2.3	Ermittlung des Reibungsbeiwertes $f$	105
4.5.2.4	Anwendung der theoretischen Lösung auf mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und mittlere Wasserüberdeckung	106
4.5.2.5	Schichtdicken auf der Deichbinnenböschung	107
4.5.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	110
4.6	Anwendungsbeispiel	112
5.	Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Ausblick	115
5.1	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	115
5.2	Empfehlungen für weitere Untersuchungen	118
6.	Schrifttum	119
7.	Symbolverzeichnis	124

## Anlagen

## 1. Einleitung

See-, Strom- und Flußdeiche schützen seit Jahrhunderten die Norddeutschen Küsten- und Ästuargebiete vor den Sturmfluten der Nordsee. Die Entwicklungsgeschichte der Deiche wurde bis heute einerseits durch die Anpassung der Deichgeometrie an die eingetretenen Sturmfluten und die daraus resultierenden Schäden geprägt, andererseits sind Deiche eine Folge der Landgewinnung fruchtbarer Marschflächen. Heutzutage hat die Hauptdeichlinie in Deutschland eine Länge von ca. 1400km<sup>1.1.)</sup> bei Deichhöhen bis zu 9,10mNN. Der Aufbau eines modernen Schar- und Vorlanddeiches ist in Abb. 1.1 dargestellt.

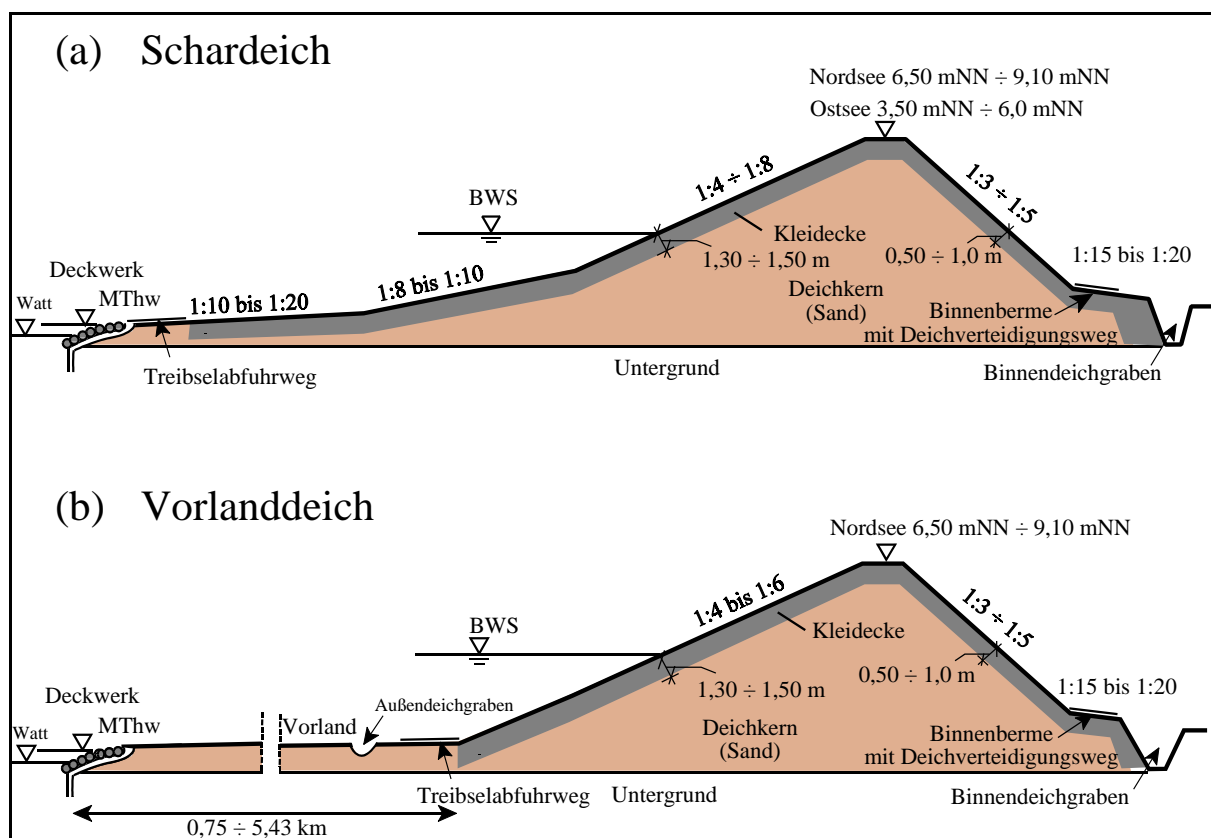


Abb. 1.1: Querschnitte durch typische moderne Seedeiche

Wurden die Deiche bis Ende des 18. Jahrhunderts infolge der zu niedrigen Kronenhöhe häufig überströmt und deswegen zerstört, so sind ab dem 19. Jahrhundert über den Deich laufende Wellen für schwere Deichschäden bzw. Deichbrüche verantwortlich (Abb. 1.2 u. 1.3), wie eine Schadensanalyse früherer Sturmfluten zeigt (Oumeraci u. Schüttrumpf, 1997). Schäden auf der

1.1.) Niedersachsen: 333km Seedeiche und 302km Stromdeiche (Generalplan Küstenschutz Niedersachsen, 1973; Generalplan Bezirksregierung Weser-Ems, 1997); Schleswig-Holstein: 358km Westküste und 68km Ostküste (Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein, 1986); Bremen 83km Stromdeiche; Hamburg 77km Stromdeiche (Hochwasserschutz in Hamburg, 1999); Mecklenburg-Vorpommern: 42km Seedeiche und 142km Boddendeiche (Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern, 1994)

Deichaußenböschung oder am Fußdeckwerk treten zwar häufiger auf, haben aber weniger schwere Konsequenzen als Deichschäden infolge Wellenüberlauf oder Überströmung.

Infolge von Wellenüberlauf (Abb. 1.2) infiltriert Wasser in die obere Kleiabdeckschicht und es kommt schließlich zu Rutschungen der Binnenböschung (Abb. 1.3), die letztlich zum Deichbruch führen können.

Die Entstehung eines Deichschadens bzw. eines Deichbruches infolge Wellenüberlauf wird durch mehrere Einflußfaktoren zusätzlich begünstigt. Hierzu zählen ungünstige meteorologische Bedingungen (z.B. Starkregenereignisse), eine nicht ausreichende Deichgeometrie (z.B. zu steile Böschungsneigungen), ein nicht ausreichender Widerstand des Bodens (z.B. hoher Sandgehalt in der Kleidecke), negative biologische Faktoren (schlechte Durchwurzelung oder Wühltierbefall), Installationen im Deich, eine schlechte Deichunterhaltung oder auch Treibgut (z.B. Bäume). Hauptursache für einen Deichschaden ist allerdings die Wechselwirkung zwischen Wellenüberlaufwasser und Boden. *Richwien u. Weißmann* (1995, 1998, 1999) zeigen, daß bei kleihaltigen Böden die Infiltration und bei sandigen Böden die Erosion maßgebend für Rutschungen der Binnenböschung sind.



Abb. 1.2: Wellenüberlauf am Christianskoog in Dithmarschen am 3.1.1976 (Diaarchiv Lehrstuhl Hydromechanik und Küsteningenieurwesen - TU Braunschweig)

Untersuchungen hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen dem Wellenüberlauf und den bodenmechanischen Eigenschaften der Kleidecke fehlen jedoch bislang nahezu vollständig. Um zuverlässige Grundlagen für eine sichere Bemessung schaffen zu können, ist eine genaue Kenntnis der hydromechanischen und bodenmechanischen Prozesse beim Wellenüberlauf unerlässlich. Ziel dieser Arbeit ist es, die entsprechenden hydrodynamischen Grundlagen auf experimenteller und theoretischer Basis zu entwickeln.

Die gegenwärtige Bemessungspraxis auf deterministischer Grundlage berücksichtigt die zahlreichen Unsicherheiten bei der Vorhersage der Bemessungsgrößen Seegang, Wasserstand und Wellenaufbauhöhe nur unzureichend und ist somit für eine Risikoabschätzung ungeeignet. Aufgrund dieser Unsicherheiten kann Wellenüberlauf nicht vollständig ausgeschlossen werden und ist entsprechend bei der Deichbemessung zu berücksichtigen. Eine mittlere Wellenüberlaufhöhe, wie sie in der derzeitigen Bemessungspraxis verwendet wird, ist als Kenngröße zur Beurteilung des Versagenspotentials ungeeignet. *Weißmann* (1999, 2001) zeigt auf der Grundlage bodenmechanischer Laboruntersuchungen, daß die mittlere Wasserüberdeckung beim Wellenüberlauf entscheidend für die Infiltration und die Überlaufgeschwindigkeiten des Wellenüberlaufes maßgeblich für die Erosion der Kleidecke sind. Die mittlere Wasserüberdeckung kann jedoch aus einer mittleren Wellenüberlaufhöhe genauso wenig bestimmt werden wie die Überlaufgeschwindigkeiten der überlaufenden Wellen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen



Abb. 1.3: Rutschung der Binnenböschung des Hauptdeiches vor dem Augustgroden an der Ostküste des Jadebusens (*MELF*, 1962)

daher die maßgebenden Parameter der Wellenüberlaufströmung bestimmt werden, die für die möglichen Versagensformen verantwortlich sind. Die relevanten Parameter stellen die Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichkrone und der Deichbinnenböschung dar. Damit sollen die Grundlagen für die physikalische Beschreibung und Entwicklung eines Berechnungsansatzes und Modellkonzeptes zur Beschreibung des Strömungsfeldes im Überlaufschwall auf der Deichaußenböschung, der Deichkrone und der Deichbinnenböschung ausgearbeitet werden. Ausgehend von der Welle am Deichfuß werden der Wellenüberlaufvorgang sowie alle beteiligten hydrodynamischen Prozesse in folgender Reihenfolge untersucht:

- (i) Bestimmung der Wellenparameter am Deichfuß,
- (ii) Transformation der einlaufenden Wellen zwischen Deichfuß und Brechpunkt einschließlich Brechvorgang,
- (iii) Wellenauflauf und Wellenablauf auf der Deichaußenböschung,
- (iv) Wellenüberlaufschwall auf der Deichkrone,
- (v) Ablauf der Überlaufströmung auf der Deichbinnenböschung.

Aufgrund dieser Zielsetzung kann die Vorgehensweise wie folgt definiert werden (Abb. 1.4): Zuerst sind die maßgebenden Überlaufparameter (Überlaufsraten, Überlaufgeschwindigkeiten, Schichtdicken) zu ermitteln, die für einen Deichschaden (Erosion oder Infiltration) an der Binnenböschung und zur Beschreibung der hydraulischen Prozesse relevant sind. Das verfügbare Schrifttum kann dann hinsichtlich der hydraulischen Prozesse im Wellenauflauf und Wellenüberlauf analysiert werden. Auf diese Weise können auch weniger relevante Prozesse abgegrenzt werden und die Zielsetzung wird weiter präzisiert, um ein Konzept für die genaue Vorgehensweise und Methodik der eigenen Untersuchungen aufzustellen. Dadurch ist eine Planung der theoretischen und experimentellen Untersuchungen möglich, um einen Berechnungsansatz zur Beschreibung der Prozesse des Wellenüberlaufschwalls zu entwickeln.

Die experimentelle Grundlage der Arbeit bilden hauptsächlich kleinmaßstäbliche Untersuchungen an einem einfachen Modelldeich. Die experimentellen Untersuchungen werden um theoretische Untersuchungen erweitert, die auf bestehenden oder neuen Ansätzen aufbauen.

Der Aufbau der Arbeit entspricht im wesentlichen der in Abb. 1.4 dargestellten Übersicht:

- In *Abschnitt 2* wird der Wissensstand zum Wellenauflauf und Wellenüberlauf dargestellt und kritisch diskutiert. Abschließend werden weniger relevante Prozesse abgegrenzt und die Methodik weiter präzisiert.

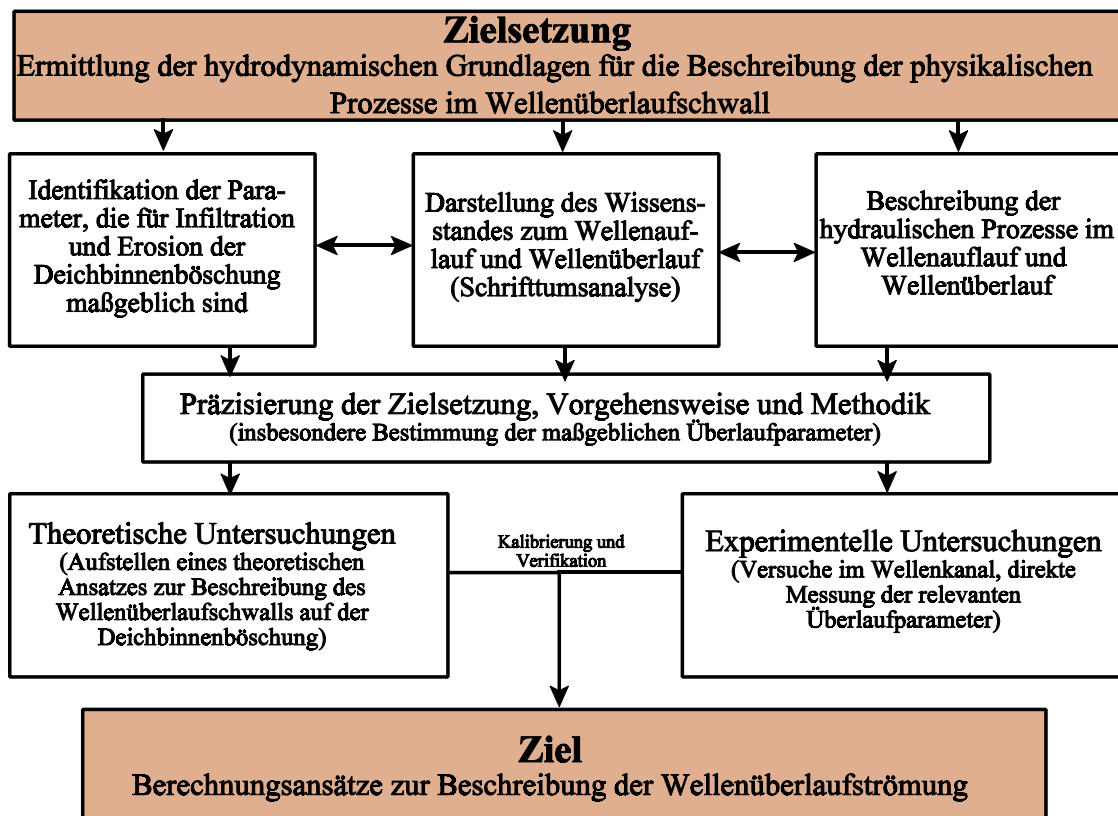


Abb. 1.4: Darstellung der Zielsetzung und Methodik der Arbeit

- In *Abschnitt 3* werden die experimentellen Untersuchungen beschrieben, wobei relevante Modell- und Maßstabeffekte diskutiert werden.
- In *Abschnitt 4* werden die experimentellen und theoretischen Untersuchungen für die einzelnen Untersuchungsbereiche dargestellt. Abschließend werden die entwickelten Berechnungsansätze kritisch diskutiert und anhand eines Anwendungsbeispiels vorgeführt.
- Den Abschluß der Arbeit bilden eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie Empfehlungen für weitere Untersuchungen in *Abschnitt 5*.



## 2. Hydromechanische Grundlagen und Wissensstand

Bei Deichen und anderen Küstenbauwerken gehören die beim Wellenüberlauf ablaufenden hydromechanischen Prozesse zu den am wenigsten untersuchten Belastungsvorgängen. Ihre genaue Kenntnis ist jedoch für die Bestimmung der auf die Deichoberfläche wirkenden Strömungs- und Druckkräfte, aber auch für die Abschätzung der Infiltration und des Widerstandsverhalten des Deiches unerlässlich.

Im folgenden werden zunächst die hydraulischen Prozesse (Wellenbrechen, Wellenauflauf, Wellenablauf und Wellenüberlauf) begriffsmäßig definiert und physikalisch beschrieben. Anschließend wird der Wissensstand zum Wellenüberlauf unter Berücksichtigung der maßgebenden Prozesse wie Wellentransformation im Flachwasser, Wellenauf- und -ablauf kurz zusammengestellt und kritisch beurteilt. Abschließend werden Zielsetzung, Untersuchungsschwerpunkte und Vorgehensweise präzisiert.

### 2.1 Begriffsbestimmung und relevante Prozesse für den Wellenüberlauf

Die einlaufenden Wellen werden auf dem Vorstrand u.a. durch Shoaling und Refraktion transformiert und erreichen unter einem Angriffswinkel  $\theta$  den Deichfuß. Am Deich selbst steilt sich die Welle auf und bricht (Abb. 2.1). Windeinfluß und überlagerte Strömungen können das Wellenbrechen entweder fördern oder hinauszögern. Die gebrochene Welle läuft als Wellenauflaufschwall auf der Deichböschung unter Umsetzung der kinetischen Energie in potentielle Energie auf, wobei Energieverluste durch innere und äußere Reibung auf der Böschung auftreten. Dabei sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden:

- (a) **Ausreichend hohe Deichkrone:** Der Auflaufschwall erreicht einen höchsten Punkt auf der seewärtigen Böschung, an dem Bewegungsumkehr eintritt. Der vertikale Abstand dieses Punktes zum Ruhewasserspiegel (RWS) ist als Wellenauflaufhöhe  $A$  definiert, die eine wichtige Bemessungsgröße bei der Festlegung der Deichsollhöhe darstellt. Das Rücklaufwasser (Wellenablauf) erfährt eine abwärtsgerichtete Beschleunigung und beeinflusst durch seinen seewärtsgerichteten Impulsstrom das Auflaufverhalten der nachfolgenden Welle. Der tiefste Punkt des Wellenablaufes ist als Wellenablaufhöhe  $z_d$  definiert (Abb. 2.1).



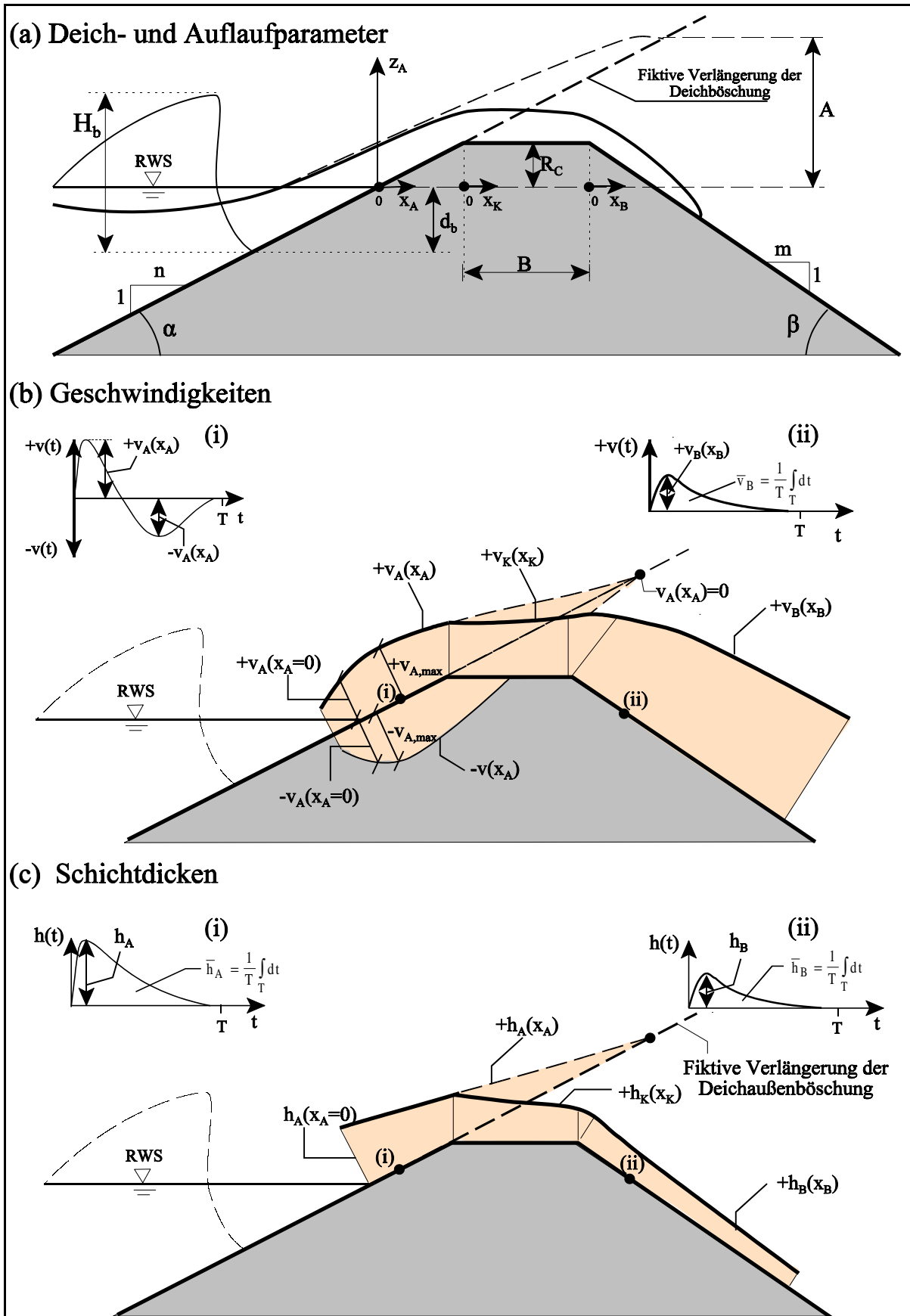


Abb. 2.2: Relevante Prozesse beim Wellenauf- und -überlauf (Definitionsskizze)

Um die Prozesse genau definieren zu können, werden die verschiedenen Bezeichnungen mit einem Index für die Deichaußenböschung (<sub>A</sub>), Deichkrone (<sub>K</sub>) und Deichbinnenböschung (<sub>B</sub>) versehen. So bezeichnen z.B.  $x_A$ ,  $x_K$  und  $x_B$  die Koordinaten auf der Außenböschung, der Deichkrone und der Deichbinnenböschung. Bezeichnungen ohne Index haben dagegen einen allgemeinen Charakter (Abb. 2.2).

## 2.2 Wellentransformation und Brechvorgang auf der Deichaußenböschung

Für den Wellenüberlaufvorgang ist die Transformation der ankommenden Welle auf der Deichaußenböschung (durch Refraktion und Shoaling) sowie beim Wellenbrechen von Bedeutung, da beide Vorgänge den transmittierten Energieanteil (Wellenüberlauf) begrenzen. Die Wellenumformung auf der Deichaußenböschung und der Brechvorgang sollen daher im folgenden diskutiert werden. Dabei werden die Höhe der brechenden Welle sowie das Brechverhalten (Brechpunkt, Brechertyp) vorwiegend von den Wellenparametern der anlaufenden Welle am Deichfuß sowie der Bauwerksgeometrie bestimmt.

Neben dem Brechertyp sind auch die Höhe der brechenden Welle  $H_b$  sowie die Lage des Brechpunktes  $d_b$  für den Wellenauflauf von Bedeutung. Auf eine detaillierte Zusammenfassung des Schrifttums zu diesen beiden Parametern ( $d_b$ ,  $H_b$ ) soll im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden, da bereits sehr umfangreiche Zusammenstellungen vorliegen (z.B. *Schütttrumpf*, 1973; *Southgate*, 1996) und beide Parameter vom Brechertyp abhängen, der für alle Prozesse in der Brandungszone eine zentrale Bedeutung hat. Daher sollen das Brechverhalten und der Brechertyp auf der Deichaußenböschung im folgenden schwerpunktmäßig untersucht werden.

### 2.2.1 Brechverhalten und Brechertyp

Wellenauflauf- und Wellenüberlaufuntersuchungen zeigen, dass dem Brechertyp eine wichtige Bedeutung bei der Belastung der Deiche zukommt. Während bei Schwall- und Sturzbrechern ein Großteil der ankommenden Wellenenergie in Wärmeenergie umgewandelt wird, kann die Wellenenergie eines Reflexionsbrechers nahezu vollständig in potentielle Auflaufenergie umgesetzt werden. Die Unterscheidung in Sturz- und Reflexionsbrecher wurde erstmals von *Iribarren u. Nogales* (1949) theoretisch untersucht und anschließend von *Miche* (1951) auf Grundlage der Linearen Wellentheorie erweitert<sup>2.1.)</sup>. Das Brechkriterium von *Iribarren u. Nogales* (1949) hat in seiner ursprünglichen Form an Bedeutung verloren und findet heutzutage

---

2.1.)

Die Terminologie für die drei Brechertypen Schwall-, Sturz- und Reflexionsbrecher wurde bereits im zweiten Weltkrieg für die Vorbereitung der Landungsoperationen von Amphibienfahrzeugen entwickelt (*Galvin*, 1968). Trotzdem wurden die Begriffe für die Brechertypen von *Iribarren u. Nogales* (1949) und *Miche* (1951) noch nicht verwendet und finden sich erstmals bei *Iversen* (1951).

seine Anwendung in Form der Brecherkennzahl  $\xi$ :

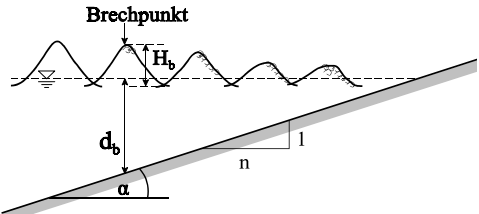
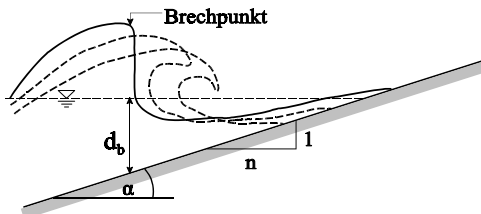
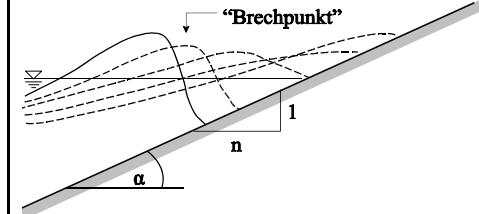
$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (2.1)$$

In Abhängigkeit des Ortes, für den die Brecherkennzahl ermittelt wird, werden im Schrifttum Definitionen der Brecherkennzahl im Tiefwasser ( $\xi_0$ ), am Deichfuß ( $\xi_d$ ) und am Brechpunkt ( $\xi_b$ ) verwendet. Im folgenden wird die Brecherkennzahl ( $\xi_d$ ) aus der Wellenhöhe  $H$  am Deichfuß sowie der Tiefwasserwellenlänge ( $L_0 = (gT^2)/(2\pi)$ ) ermittelt.

Die Brecherkennzahl  $\xi$  beschreibt den Brechertyp (*Battjes*, 1974) und ist ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Prozessen wie Wellenreflexion, Wellenauflauf, Wellenüberlauf, etc.. Neben dem Sturzbrecher und dem Reflexionsbrecher hat sich der Schwallbrecher von ursprünglich neun Brechertypen (*Galvin*, 1968) als Hauptbrechertyp durchgesetzt. Tab. 2.1 zeigt eine Klassifikation der Brechertypen und ihrer Bedeutung für die Prozesse in der Brandungszone. Diese Prozesse zeigen bei Sturzbrechern eine deutliche Abhängigkeit von der Brecherkennzahl  $\xi$  während bei Reflexionsbrechern der Einfluß der Wellenperiode vernachlässigt werden kann. Der Übergang zwischen Sturz- und Reflexionsbrecher, der im Schrifttum häufig als „Collapsing“-Brecher bezeichnet wird, stellt die kritische Belastung des Deiches hinsichtlich des Wellenauflaufes (*Bruun u. Günbak*, 1976) und des Wellenüberlaufes (*Nagai u. Takada*, 1970) dar.

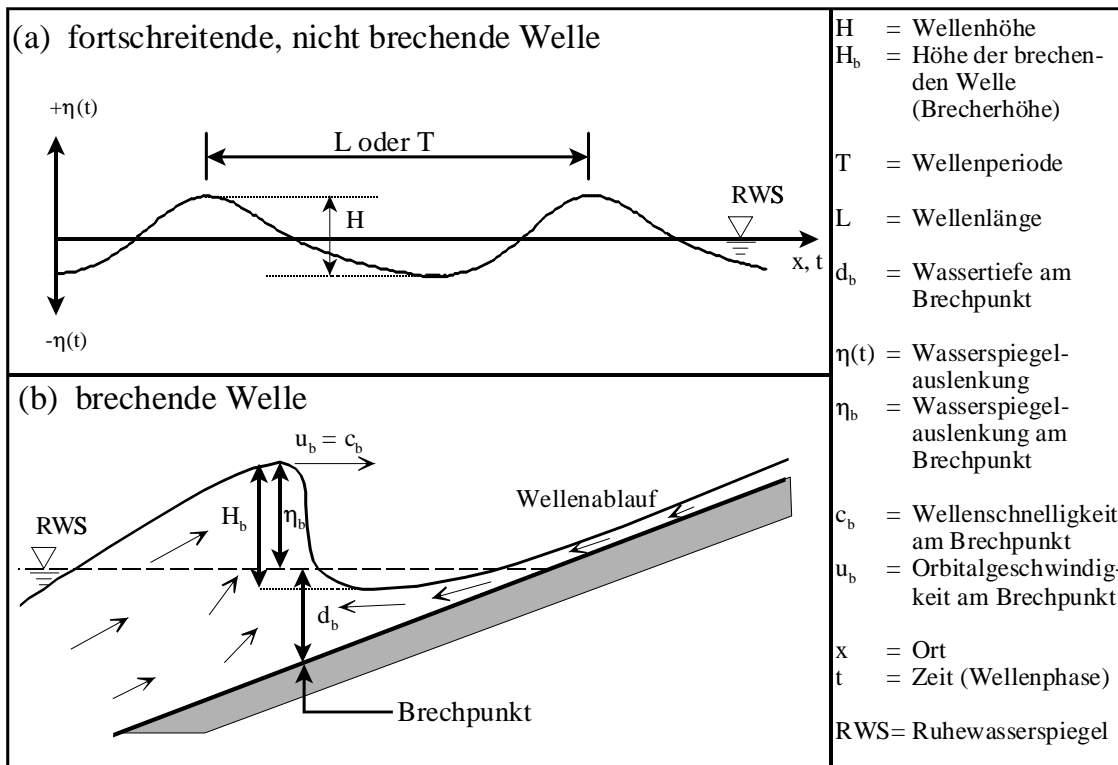
In diesem Zusammenhang muß deutlich gemacht werden, dass die Beeinflussung des Brechertyps durch den Wellenüberlauf bislang nicht behandelt wurde. *Iversen* (1951) und *Tautenhain* (1981) untersuchen den Einfluß der Vorwelle bzw. des Wellenablaufes auf die nachfolgende Welle und ihr Brechverhalten (Abb. 2.3). *Iversen* (1951) zeigt, daß geringere Wellenablaufgeschwindigkeiten zu einem späteren Wellenbrechen und somit zu einer höheren brechenden Welle führen. Überträgt man diese Erkenntnis auf den Wellenüberlauf, so führt Wellenüberlauf zu einer Veränderung des Brechverhaltens. Durch die geringere Bremswirkung des ablaufenden Wassers bricht die Welle später, der Brechertyp verändert sich somit vom Sturzbrecher zum Reflexionsbrecher. Im Gegensatz dazu kommt es bei sehr durchlässigen Strukturen aufgrund der erhöhten Energiedissipation an der Bauwerksböschung zu einem früheren Wellenbrechen, wodurch sich der Übergang vom Sturzbrecher zum Reflexionsbrecher zu kleineren Brecherkennzahlen verschiebt (*Takahashi et al.*, 1995).

Tab. 2.1: Klassifikation der Brechertypen und deren Einfluß auf die Prozesse auf der Deichböschung

Brechertyp	Schwallbrecher	Sturzbrecher	Reflexionsbrecher
Abbildung			
Bereich <sup>*)</sup>	$\xi_d = \tan \alpha \left( H_b / L_0 \right)^{-0,5} < 0,4$	$0,4 \leq \xi_d = \tan \alpha \left( H_b / L_0 \right)^{-0,5} \leq 2,0$	$\xi_d = \tan \alpha \left( H_b / L_0 \right)^{-0,5} > 2,0$
Beschreibung	Wellenbrechen unter Luftaufnahme am Wellenkamm über mehrere Wellenlängen	Klassisches Wellenbrechen unter Ausbildung einer Lufttasche	Auflaufen der Welle auf der Böschung
Auftreten	bei natürlichen Stränden	bei Deichen und Deckwerken mit flachen Böschungen	bei Deichen und Deckwerken mit steilen Böschungen
Brechkriterium <sup>*)</sup>	$H_b / d_b = 0,8$	$H_b / d_b = 0,8 \div 1,2$	$H_b / d_b = 1,2$
Wellenauflauf <sup>**)</sup>	$A_{98} / H_s = 1,5 \cdot \xi_d$		$A_{98} / H_s = 3,0$
Wellenüberlauf <sup>**)*)</sup>	$\frac{q}{\sqrt{g} H_s^3} = \frac{0,06}{\sqrt{\tan \alpha}} \xi_d \exp \left( -4,7 \frac{R_c}{H_s \cdot \xi_d} \right)$		$\frac{q}{\sqrt{g} H_s^3} = 0,2 \exp \left( -2,3 \frac{R_c}{H_s} \right)$
Reflexion <sup>*)</sup>	$\chi_r = 0,1 \xi_d^2$		$\chi_r = 0,6 \div 1,0$
Druckschlagbelastung	keine Druckschlagbelastung	Druckschlagbelastung	keine Druckschlagbelastung

<sup>\*)</sup> Battjes (1974)

<sup>\*\*)\*)</sup> Van der Meer u. Janssen (1995)



**Abb. 2.3:** Fortschreitende, nicht brechende Welle und brechende Welle (Definitionsskizzen)

### 2.2.2 Zusammenfassung und kritische Bewertung

Die Brecherkennzahl  $\xi$  beschreibt den Brechertyp und stellt den maßgebenden Parameter für viele Prozesse auf der Deichböschung dar (Wellenbrechen, Wellenauflauf, Wellenüberlauf, etc.). Daher hat die Brecherkennzahl für Untersuchungen zum Wellenauflauf und Wellenüberlauf eine zentrale Bedeutung.

Detaillierte Untersuchungen zum Brechertyp wurden aber nur für sehr flache Strandböschungen durchgeführt (z.B. *Galvin* (1968) 1:n=1:5 bis 1:20). Die Übertragbarkeit auf steile Deichböschungen (z.B. 1:3 bis 1:6) mit entsprechend höherer Reflexion wird häufig vorausgesetzt (z.B. *Van der Meer u. Janssen*, 1995), ist aber bislang nicht systematisch überprüft worden. Daher sind experimentelle Untersuchungen erforderlich, um die Eignung der Brecherkennzahl  $\xi$  zur Beschreibung des Brechertyps bei steilen Böschungen zu verifizieren.

## 2.3 Wellenauflauf

Die Wellenauflaufhöhe  $A$  an geböschten Bauwerken gehört zu den am meisten untersuchten Parametern (z.B. *Wassing*, 1957; *Hunt*, 1959; *Tautenhain*, 1981; *Van der Meer et al.*, 1998), weil sie eine wesentliche Bemessungsgröße bei der Gestaltung von Deichen darstellt, für die kaum Wellenüberlauf zugelassen ist. Das vorhandene Schrifttum zu den Berechnungsansätzen wurde bereits umfassend in verschiedenen Arbeiten zusammengefaßt (z.B. *Franzius*, 1965; *Schijf*, 1972; *Douglass*, 1984; *Herbich*, 1990; *Müller*, 1995; *Burcharth*, 1998; *Verdonck et al.*, 1998). Daher soll auf eine erneute Zusammenstellung verzichtet werden. Dies ist hier auch nicht erforderlich, da der Wellenauflaufhöhe in dieser Arbeit nur untergeordnete Bedeutung zukommt. Viel wichtiger als die Bestimmung der Wellenauflaufhöhe sind die Prozesse, die zum Wellenauflauf führen.

Hauptziel dieses Abschnittes ist es daher, die maßgebenden physikalischen Prozesse für den Wellenauflauf aufzuzeigen. Dabei soll insbesondere auf die Geschwindigkeiten und Schichtdicken des Auflaufschwalls eingegangen werden.

### 2.3.1 Geschwindigkeiten des Wellenaufaufschwalls

Im Schrifttum werden zwei verschiedene Arten von Auf- und Ablaufgeschwindigkeiten unterschieden (Abb. 2.4):

- Auf- bzw. Ablaufgeschwindigkeit der Wellenaufaufzunge (auch als Schwall- oder Frontgeschwindigkeit bezeichnet)
- lokale Auf- bzw. Ablaufgeschwindigkeiten während eines Auflaufereignisses

Dabei stellt die Frontgeschwindigkeit der Aufaufzunge die maximale lokale Strömungsgeschwindigkeit während eines Auflaufereignisses dar. Untersuchungen liegen bislang nur zu den Frontgeschwindigkeiten (*Schüttrumpf et al.*, 2000) vor, während die lokalen Auflaufgeschwindigkeiten bislang überhaupt nicht untersucht wurden. Grund hierfür ist das Interesse an der Ermittlung maximaler Auflaufgeschwindigkeiten, für die die Bestimmung der Frontgeschwindigkeit ausreicht, aber auch die Schwierigkeiten bei der Messung lokaler Auflaufgeschwindigkeiten insbesondere im verkleinerten Modell. Daher gelten die folgenden Ausführungen für die Geschwindigkeiten der Auflauffront, die im folgenden als Auflaufgeschwindigkeit bezeichnet werden.

Die Wellenauflaufhöhe  $A$  hängt von der Geschwindigkeit der Wellenaufaufzunge  $v_A$  ab, für die die folgenden Randbedingungen gelten (Abb. 2.4):

- $z_A(v_{A,\max})$  = Höhenlage der maximalen Auflaufgeschwindigkeit auf der Deichaußenböschung
- $v_A(A) = 0$  = maximale Wellenauflaufhöhe



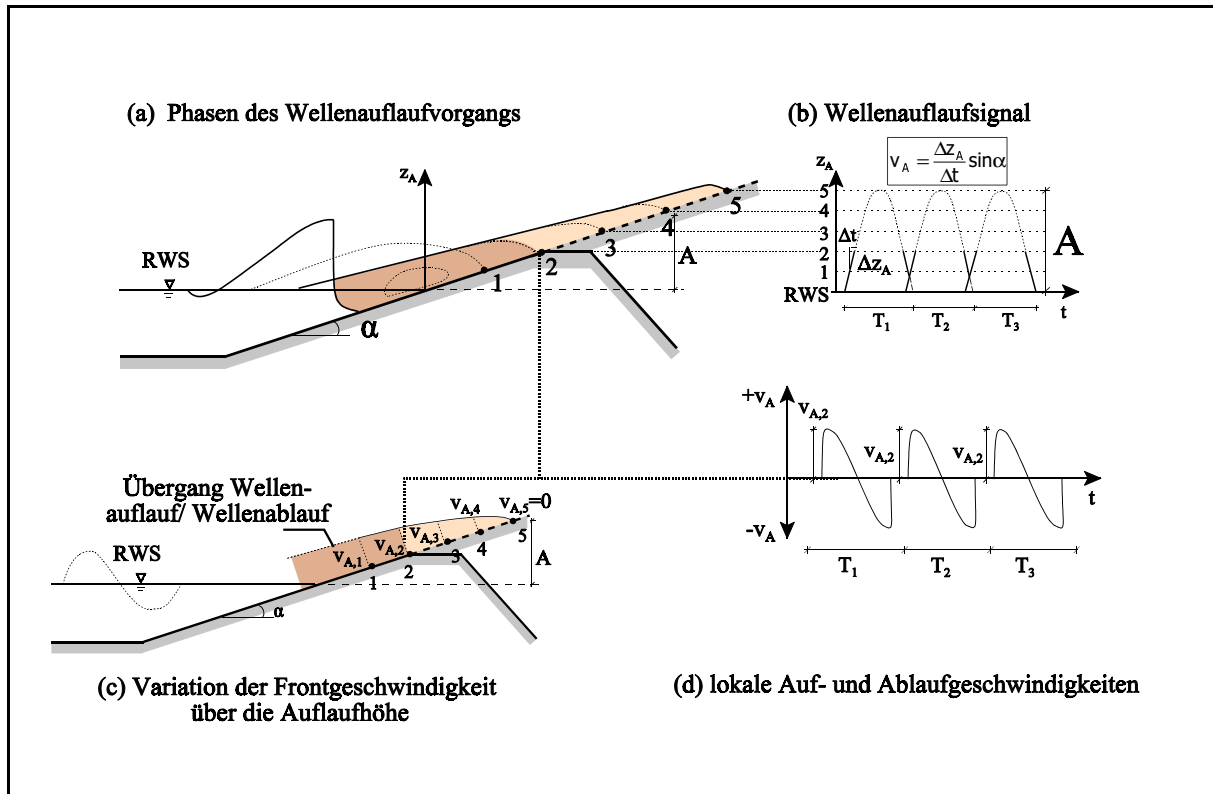


Abb. 2.4: Definition der Geschwindigkeiten im Wellenaufbau

Die Höhenlage der maximalen Aufbaugeschwindigkeit  $z_A(v_{A,max})$  wurde bislang nur indirekt aus Wellenaufbaumessungen ermittelt. Da der Wellenaufbauprozess für Sturzbrecher zu einem Zeitpunkt beginnt, zu dem der Wellenablaufvorgang noch nicht abgeschlossen ist, kommt es zu einer Überlagerung von Wellenaufbau und Wellenablauf (Tautenhain, 1981). Daher kann die Höhenlage der maximalen Aufbaugeschwindigkeiten aus dem Wellenaufbausignal für Sturzbrecher nicht ermittelt werden. Die maximalen Wellenaufbaugeschwindigkeiten nach Führböter (1991) bzw. Schulz (1992) stellen somit die maximalen Wellenaufbaugeschwindigkeiten auf dem vom Wellenablauf unbeeinflussten Teil der Deichaußenböschung dar.

Ab dem Punkt  $z_A(v_{A,max})$  folgt die Abnahme der Aufbaugeschwindigkeit bis zur maximalen Wellenaufbauhöhe A entsprechend des allgemeinen Energieerhaltungssatzes:

$$\Delta E_{kin} - \Delta E_{pot} - \Delta E_{Reibung} = 0 \quad (2.2)$$

mit:

$$\Delta E_{kin} = \frac{m_g}{2} (v_{A,max}^2 - [v_A(z_A)]^2) \quad : \text{Änderung der kinetischen Energie}$$

$$\Delta E_{pot} = m_g \cdot g \cdot z_A \quad : \text{Änderung der potentiellen Energie}$$

$$\Delta E_{Reibung} = f[v_A, h_A, z_A, \text{Böschungsrauheit}] \quad : \text{Änderung der Reibungsenergie}$$

$h_A(z_A)$  : Schichtdicke des Aufbauschwells am Ort  $z_A$

$m_g$  : Masse eines Wasserteilchens, das sich mit der Wellenfront fortbewegt.

Durch Umformen und Auflösen von Gl. (2.2) nach der Geschwindigkeit  $v_A(z_A)$  folgt:

$$v_A(z_A) = \sqrt{v_{A,\max}^2 - 2 \cdot g \cdot z_A - \Delta E_{\text{Reibung}}^*} \quad (2.3)$$

Diese Gleichung bildet die Grundlage mehrerer Untersuchungen zum Wellenauflauf (*Shen u. Meyer, 1963; Freeman u. Le Méhauté, 1964; Franzius, 1965; Tautenhain, 1981; Van der Meer u. Klein Breteler, 1990; Schüttrumpf et al., 2000*). Der Einfluß der Reibung wird empirisch durch einen „Auflaufbeiwert“  $k^*$  (2.2.) berücksichtigt. Die maximale Auflaufgeschwindigkeit  $v_{A,\max}$  folgt somit aus Gl. (2.3) für  $z_A=A$  und  $v_A(A) = 0$  zu:

$$v_{A,\max} = k^* \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot A} \quad (2.4)$$

Damit gilt  $v_{A,\max}$  strenggenommen nur für den RWS ( $z_A=0$ ).

Tab. 2.2 gibt eine Aufstellung der Lösungen für den Parameter  $k^*$  innerhalb der oben erwähnten Untersuchungen. Bei der Diskussion der Ergebnisse in Tab. 2.2 ist zu beachten, daß *Franzius* im Gegensatz zu *Tautenhain* bzw. *Van der Meer u. Klein Breteler* die maximalen Auflaufgeschwindigkeiten  $v_{A,\max}$  nicht auf den RWS bezieht und ein Bezug auf den RWS zu etwas niedrigeren Beiwerten  $k^*$  führt. Auffällig ist die gute Übereinstimmung des Beiwerts  $k^*$  zwischen *Tautenhain* (1981) und *Van der Meer u. Klein Breteler* (1990) für Ablaufgeschwindigkeiten (Tab. 2.2).

Tab. 2.2 zeigt weiterhin, daß die maximalen Auflaufgeschwindigkeiten am Deich um bis zu 20% größer als die maximalen Ablaufgeschwindigkeiten auf der Außenböschung sind. Nur *Führböter u. Witte* (1989) finden um ca. 50% größere Ablaufgeschwindigkeiten, was durch die verwendete Meßtechnik verursacht wird, die für die Erfassung von Ablaufgeschwindigkeiten nicht geeignet ist.

Weitere Verfahren zur Ermittlung der Auf- und Ablaufgeschwindigkeiten besitzen aufgrund ihres vorwiegend empirischen Charakters wenig Bedeutung für diese Arbeit. Eine umfassende Aufstellung der vorliegenden Untersuchungen zu den Auf- und Ablaufgeschwindigkeiten wurde von *Oumeraci u. Schüttrumpf* (1999a) erstellt, wo auch die empirischen Ansätze diskutiert werden. Die numerischen Verfahren werden in Abschnitt 2.4.4 behandelt.

---

2.2.) Mit:  $\Delta E_{\text{Reibung}}^* = \alpha_K \cdot v_A^2 \cdot m_g / 2$ ;  $z_A=A$  und  $v_A(A)=0$  eingesetzt in Gl. (2.3) folgt:  $A + \alpha_K \cdot \frac{v_{A,\max}^2}{2 \cdot g} = \frac{v_{A,\max}^2}{2 \cdot g}$ .

Durch Umformung folgt:  $v_{A,\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot A}{1 - \alpha_K}}$  und damit gilt:  $k^* = \sqrt{\frac{1}{1 - \alpha_K}}$

Tab. 2.2: Auf- bzw. Ablaufbeiwert  $k^*$  [-] für Wellenauflauf- und Wellenablaufgeschwindigkeiten ( $v_{A,max} = \pm k^* \cdot \sqrt{2 g A}$ )

Autor	$k^*$ (Auflauf)	$k^*$ (Ablauf)	Bauwerk
Shen u. Meyer (1963)	1,0	1,0	Deich
Freeman u. Le Méhauté (1964)	$\sqrt{\frac{\left(1 + \frac{f \cdot n}{(u/c)^2}\right)}{(1 + (u/c))(1 + 2(u/c))}}$	Nicht untersucht	Deich
Franzius (1965)	1,0	1,0	Deich
Tautenhain (1981)	0,97	0,82	Deich
Van der Meer u. Klein Breteler (1990)	$\sqrt{\frac{L_0}{4 \cdot A}}$	0,78	Deich
Schüttertrumpf et al. (2000)	0,85 $\sigma' = 18\%$	0,62 $\sigma' = 22\%$	geschütteter Wellenbrecher

mit:

$f$  = Reibungsbeiwert =  $g/C_h^2$ ;  $C_h$  = Chezy-Koeffizient;  $c$  = Wellenschnelligkeit;  $u$  = horiz. Orbitalgeschwindigkeit;  
 $n$  = Neigung der Außenböschung;  $L_0$  = Wellenlänge im Tiefwasser;  $A$  = Wellenauflaufhöhe

### 2.3.2 Schichtdicken des Wellenaufschwalls

Schichtdicken spielten in den bisherigen Untersuchungen kaum eine Rolle. Ihre Kenntnis ist jedoch von Bedeutung, da sie maßgeblichen Einfluß auf die Infiltration in die Deichböschung haben (s. Abschnitt 1). Zusammen mit den entsprechenden Geschwindigkeiten beschreiben sie das Strömungsfeld des Auflaufereignisses.

Experimentelle Untersuchungen zu den Schichtdicken wurden von *Roos u. Battjes* (1976), *Tautenhain* (1981) und *Waal* (1996) durchgeführt. Alle Autoren finden unabhängig voneinander eine lineare Abnahme der mittleren Schichtdicke  $h_A(x_A)$  vom RWS ( $x_A=0$ ) bis zur maximalen Wellenauflaufhöhe  $A$  und geben folgende Funktion zur Bestimmung von  $h_A$  an (Abb. 2.5):

$$h_A = c_2 \cdot (n \cdot A - x_A) \quad (2.5)$$

mit:  $c_2 = 0,041$  [-] (*Tautenhain*, 1981)  
 $c_2 = 0,088$  [-] (*Roos u. Battjes*, 1976)<sup>2.3.)</sup>  
 $c_2 = 0,065$  [-] (*Waal*, 1996)

2.3.)

Die Frage, wieso *Roos u. Battjes* doppelt so hohe Schichtdicken wie *Tautenhain* finden, kann nur durch die unterschiedliche Meßtechnik erklärt werden. Es ist zu vermuten, daß bei *Roos u. Battjes* der Null-Offset nicht richtig eingestellt wurde, da die Zeitverläufe auch an höheren Positionen auf der Böschung ständig eine bestimmte Schichtdicke zeigen ( $h_A > 0$ ).

Gl. (2.5) beschreibt die böschungsparallele Entwicklung der mittleren Schichtdicke  $h_A(x_A)$  eines Wellenauflaufereignisses. Untersuchungen bzgl. der mittleren Wasserüberdeckung  $\bar{h}_A(x_A)^{(2.4.)}$ , die eng mit der Infiltration verbunden ist (s. Abschnitt 1), liegen bislang nicht vor. Dies gilt auch hinsichtlich von Untersuchungen zu den Schichtdicken auf Deichkrone und Deichbinnenböschung.

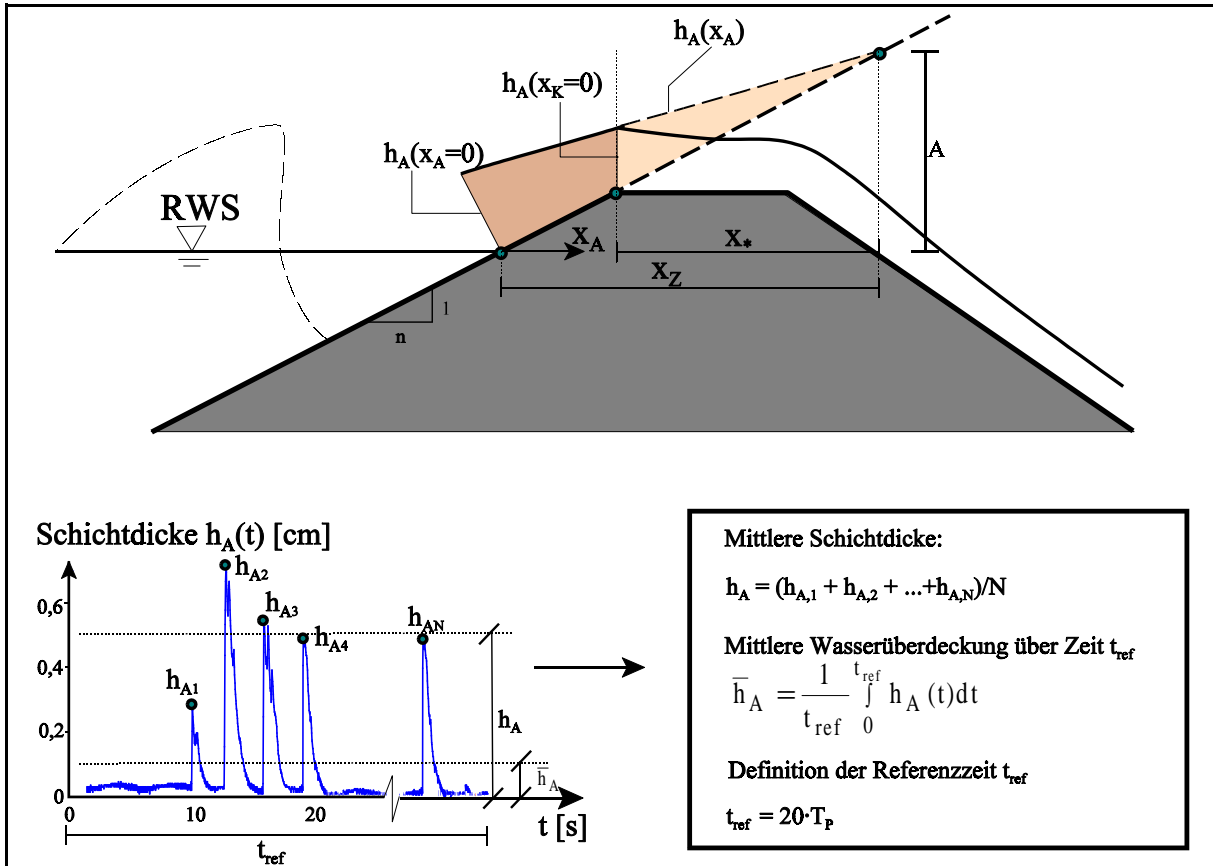


Abb. 2.5: Definition der Schichtdicken  $h_A$  und  $\bar{h}_A$  im Wellenaufbau

### 2.3.3 Zusammenfassung und kritische Bewertung

Die vorhandenen Ansätze zu den Prozessen im Wellenaufbau (Schichtdicken und Aufbaugeschwindigkeiten):

- beschreiben den örtlichen Verlauf der mittleren Schichtdicken  $h_A$  und der Auf-  
laufgeschwindigkeiten  $v_A$  der Wellenzunge (Frontgeschwindigkeit) nach dem  
Wellenbrechen,
- liefern eine erste Näherung der Schichtdicke  $h_K$  und der Überlaufgeschwindigkeit  
 $v_K$  am Übergang von der Deichaußenböschung zur Deichkrone und

2.4.) Die mittlere Wasserüberdeckung ist wie folgt definiert:

$$\bar{h}_A = \frac{1}{t_{\text{ref}}} \int_0^{t_{\text{ref}}} h_A(t) \, dt$$

- stellen somit eine wichtige Eingangsgröße beim Übergang des Wellenaufschwalls auf die Deichkrone und damit auch auf die Deichbinnenböschung dar.

Allerdings sind die vorliegenden Ansätze noch mit großen Unsicherheiten verbunden. Dies wird insbesondere für Schichtdicken mit Differenzen bis zu 100% deutlich (s. Gl. 2.5). Grund hierfür sind u.U. die unzureichende Variation der Versuchsbedingungen (Bisherige Untersuchungen wurden jeweils nur für eine Deichneigung durchgeführt) und die Tatsache, daß Untersuchungen zu Schichtdicken aber auch zu Auflaufgeschwindigkeiten bislang eher ein Nebenprodukt der Wellenaufaufermittlung darstellten und daher bislang nie systematisch untersucht worden sind.

Durch die bisherigen Ansätze werden dagegen folgende Prozesse nicht beschrieben:

- zeitliche Variation von Schichtdicke  $h_A(t)$  und Auflaufgeschwindigkeit  $v_A(t)$  an einem festen Ort auf der Deichaußenböschung,
- Schichtdicke und Auflaufgeschwindigkeit auf der Außenböschung, wenn Wellenüberlauf vorliegt,
- Schichtdicken ( $h_k, h_B$ ) und Überlaufgeschwindigkeiten ( $v_k, v_B$ ) auf Deichkrone und Deichbinnenböschung.

## 2.4 Wellenüberlauf

Der Wellenüberlauf folgt aus dem Wellenauflauf, wenn dieser die Kronenhöhe  $z_K$  eines Bauwerkes überschreitet. Zahlreiche Untersuchungen wurden bislang für die Bestimmung der mittleren Wellenüberlaufrate  $q$  durchgeführt (s. Tab. 2.3). Neuere Ergebnisse von Modellversuchen liegen mittlerweile auch für individuelle Überlaufmengen vor. Im folgenden sollen die verschiedenen Überlaufmodelle kurz vorgestellt und diskutiert werden. Dabei sollen nur "deichtartige" Bauwerke behandelt werden, denn das Überlaufverhalten z.B. an vertikalen Wänden ist aufgrund der überwiegend vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten anders als bei den geneigten Strukturen, bei denen überwiegend böschungsparelle Strömungsgeschwindigkeiten auftreten.

Die vorliegenden Methoden zur Bestimmung der mittleren Wellenüberlaufrate  $q$  können in vier Gruppen eingeteilt werden, die chronologisch in Tab. 2.3 zusammengestellt sind:

- (i) Empirische Verfahren;
- (ii) Berechnungsansätze auf der Grundlage der „Wehrformel“;
- (iii) Indirekte Berechnungsansätze aus dem „Wellenaufaufkeil“;
- (iv) Numerische Modelle.

Diese Verfahren und deren Bedeutung für die vorliegende Arbeit werden im folgenden beschrieben.

### 2.4.1 Empirische Verfahren

Die Ergebnisse der ersten Wellenüberlaufuntersuchungen an überwiegend steilen Böschungen ( $n < 3$ ) mit *regelmäßigen Wellen* wurden in Diagrammen dargestellt (s. Tab. 2.3). Dazu wurde die mittlere Wellenüberlaufrate  $q$  als Funktion der Wellenparameter (Wellenhöhe  $H$  oder Wellenperiode  $T$ ) bzw. der Freibordhöhe  $R_C$  aufgetragen. Diese Untersuchungen ergaben:

- einen ersten Hinweis auf die exponentielle Abhängigkeit zwischen Wellenüberlaufrate  $q$  und Freibordhöhe  $R_C$  bzw. Wellenhöhe  $H$ .
- einen Einfluß des Brechertyps auf die Wellenüberlaufrate  $q$ .

Da die Anwendbarkeit von dimensionsbehafteten Diagrammen begrenzt bzw. umständlich ist, wurden Wellenüberlaufformeln auf Grundlage von Regressionsanalysen entwickelt. Bei diesen Verfahren wird eine dimensionslose Wellenüberlaufrate  $Q_*$  empirisch mit einer dimensionslosen Freibordhöhe  $R_*$  verknüpft. Die Regressionsgleichungen haben eine der beiden folgenden Formen:

$$Q_* = Q_0 (1 - R_*)^b \quad (2.6)$$

$$Q_* = Q_0 \cdot \exp(-b \cdot R_*) \quad (2.7)$$

mit:  $Q_*, R_* =$  dimensionslose Überlaufparameter (Tab. 2.4)  
 $Q_0 =$  dimensionslose Überlaufrate für  $R_C=0$   
 $b =$  dimensionsloser Regressionsparameter

Für die Definition der dimensionslosen Überlaufparameter  $Q_*$  und  $R_*$  besteht eine Vielzahl von Alternativen (Tab.2.4). Die Wahl geeigneter dimensionsloser Überlaufparameter  $Q_*$  und  $R_*$  ist dabei wesentlich vom untersuchten Bauwerkstyp abhängig (*Schüttrumpf et al.*, 1999). Eine allgemeine Regelung für die Wahl von  $Q_*$  und  $R_*$  besteht nicht. Die Eignung der einzelnen Varianten ist allerdings abhängig von den verwendeten Wellen- und Bauwerksparametern. So besteht bei zahlreichen Überlaufparametern  $R_*$  eine enge Verbindung zwischen Freibordhöhe  $R_C$  und Wellenaufbauhöhe  $A_{98}$ , da gilt:

$$A_{98} \propto \tan \alpha \ T_m \sqrt{g \ H_s} \quad (2.8)$$

mit:  $A_{98}$  = Wellenaufbauhöhe, die von 2% aller Wellen überschritten wird [m]  
 $T_m$  = mittlere Wellenperiode [s]  
 $H_s$  = signifikante Wellenhöhe [m]

Auch für den Überlaufparameter  $Q_*$  bestehen Abhängigkeiten zwischen der Wellenüberlaufrate  $q$  und den maßgebenden Wellen- ( $H_s$ ,  $T_m$ ) und Bauwerksparametern ( $\tan \alpha$ ). Eine enge Verknüpfung zu einem übergeordneten Parameter (für  $R_*$  ist dies die Wellenaufbauhöhe  $A_{98}$ ) besteht bislang nicht und wird daher in Abschnitt 4.5 hergeleitet.

Die Bedeutung der Verfahren auf Grundlage von Regressionsrechnungen besteht u.a. in:

- der einfachen Ermittlung von mittleren Überlaufzeiten  $q$  oder individuellen Wellenüberlaufmengen  $V^{2.5.)}$ ,
- der Verwendung bauwerksspezifischer dimensionsloser Überlaufparameter  $Q_*$ ,  $Q_0$ ,  $R_*$  und  $b$ . Damit ist auch eine Anwendbarkeit auf komplexe Bauwerksgeometrien gegeben (*Schüttrumpf et al.*, 1999).

Allerdings ist eine direkte Herleitung der Überlauffunktion  $q(t)$  bzw. der beim Überlauf auftretenden Geschwindigkeits- und Schichtdickenverläufe ( $v$ ,  $h$ ) aus den mittleren Überlaufzeiten  $q$  bislang nicht möglich, da Übertragungsfunktionen zwischen den Parametern  $q$ ,  $v$  und  $h$  fehlen.

---

2.5.)

*Van der Meer u. Janssen* (1995) ermitteln individuelle Wellenüberlaufmengen  $V$  unter Verwendung einer Weibull-Verteilung aus den mittleren Wellenüberlaufzeiten  $q$ .

$$P(V) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{V}{a} \right)^{\frac{3}{4}} \right) \quad \text{mit} \quad a = 0,84 \frac{T_m q}{P_{ow}}$$

mit:  $P(V)$  = Unterschreitungswahrscheinlichkeit für Überlaufvolumen  $V$ ;  $V$  = Überlaufvolumen einer Welle;  $T_m$  = mittlere Wellenperiode;  $q$  = mittlere Wellenüberlaufrate;  $P_{ow}$  = Verhältnis der überlaufenden Wellen zum Verhältnis der ankommenden Wellen

**Tab. 2.3:** Vorliegende Untersuchungen zum Wellenüberlauf von Deichen bzw. „deichartigen Bauwerken“

	Autor	Jahr	Modell	Wellen	$\tan \alpha =$	q o. V	Anmerkung
1.	Saville	1953	D	RW	1:0	q	1. Arbeit Wellenüberlauf
2.	Saville	1955	D	RW	1:0; 1:1,5; 1:3	q	Fortsetzung Saville (1953)
3.	Sibul	1955	D	RW	1:2; 1:3	q	Einfluß H/L; d/L; B
4.	Paape	1960	D	S	1:2 - 1:8	q	windgenerierte Wellen
5.	Tominaga	1966	D	RW	1:1	q	Deckwerk
6.	Kikkawa	1968	W	RW	1:1,73	q	1. Arbeit mit Wehrformel
7.	Nagai	1970	A	RW	1:0 - 1:4	q	1. Arbeit mit Auflaufvolumen
8.	Cross	1972	A	RW	1:1,5	q	geschütteter Wellenbrecher
9.	Roos	1976	A	RW	1:3; 1:5; 1:7	q	1. Arbeit für flache Seedeiche
10.	Weggel	1976	R	RW	1:3; 1:6	q	1. Arbeit mit exponentieller Funktion
11.	Shi-Igai	1977	W	RW	1:2,75	q	Rayleigh-Verteilung ⇒ Wellenspektren
12.	Owen	1980	R	S	1:1; 1:2; 1:4	q	1. Anwendung Gl.(2.7)
13.	Tautenhain	1981	A	RW+S	1:6	q	Auflauf und Überlauf
14.	Kobayashi	1989	N	RW	1:1,5; 1:3	q(t)	numerisch (FDM)
15.	Özhan	1990	W	E	1:1; 1:2; 1:4	q	Einzelwellen
16.	Pilarczyk	1990	R	S	1:4	q	Fortsetzung bei Waal u. Van der Meer
17.	Yamamoto	1992	A	RW	1:2; 1:4	q	Übertragbarkeit ⇒ Wellenspektren
18.	Waal	1992	R	S	1:3 - 1:8	q	Berücksichtigung A
19.	V. der Meer	1995	R	S	1:3 - 1:8	q; V	1. Arbeit mit individuellen Wellenüberlaufmengen
20.	Van Gent	1995	N	RW; S	1:2 ÷ 1:5	q(t)	FDM; auch durchlässige Böschung
21.	Hedges	1997	W+R	S	1:1; 1:2; 1:4	q	Kombination W + R
22.	Dodd	1998	N	RW;S	1:1,5; 1:3	q(t)	numerisch (FVM)
23.	Van Gent	1999	R	S	1:4	q	Einfluß von Doppelpeakspektren
24.	Sauer	2000	R	S	1:6	q	Einfluß von naturnahen Wellenspektren

Abkürzungen:

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <p>1.) Modelltyp<br/>D = Diagramm<br/>W = Wehrformel<br/>A= Auflaufkeil<br/>R = Regression<br/>N = Numerisches Modell</p> | <p>2.) Wellentyp<br/>RW = regelmäßige Wellen<br/>S = Wellenspektren<br/>E = Einzelwelle<br/>3.) Numerisches Modell<br/>FDM = Finite Differenzen Methode<br/>FVM= Finite Volumen Methode</p> | <p>4.) Wellenüberlaufmenge<br/>q = mittlere Überlaufrate<br/>V = indiv. Überlaufvolumen</p> |
|---|---|---|



Tab. 2.4: Zusammenstellung der vorliegenden dimensionslosen Überlaufparameter  $Q_*$  und dimensionslosen Freibordhöhen  $R_*$

Autor		$Q_*$	$R_*$
1.	Saville und Caldwell (1953)	$\frac{q \cdot T}{H \cdot L}$	$\frac{R_C}{H}$
2.	Sibul (1955)	$\frac{q \cdot T}{H^2}$	$\frac{R_C}{H}$
3.	Paape (1960)	$\frac{q \cdot T}{H \cdot L}$	$\frac{R_C}{H \cdot \tan^{3/2} \alpha}$
4.	Weggel (1976)	$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H^3}$	$\frac{R_C}{T \cdot \sqrt{g \cdot H}}$
5.	Owen (1980)	$\frac{q}{T_m \cdot g \cdot H_s}$	$\frac{R_C}{T_m \cdot \sqrt{g \cdot H_s}}$
6.	Ahrens und Heimbaugh (1988)	$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_s^3}$	$\frac{R_C}{(H_s^2 \cdot L)^{1/3}}$
7.	Waal u. Van der Meer (1992)	$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_s^3}$	$\frac{A_{98} - R_C}{H_s}$
8.	Pilarczyk (1994)	$\frac{q}{H_s \cdot g \cdot T_m \cdot \sqrt{\tan \alpha}}$	$\frac{R_C}{\tan \alpha \cdot T_m \cdot \sqrt{g \cdot H_s}}$
9.	Pedersen (1996)	$\frac{q \cdot T_m}{L^2}$	$\frac{R_C}{H_s}$
10.	Hedges u. Reis (1997)	$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot A_{98}^3}$	$\frac{R_C}{\tan \alpha \cdot T_m \cdot \sqrt{g \cdot H_s}}$
11.	Franco u. Franco (1999)	$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_s^3}$	$\frac{R_C}{H_s}$

mit:  $q$  = mittlere Wellenüberlauftrate [ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ]  $H$  = Wellenhöhe (*regelm. Welle*) [m]  
 $R_C$  = Freibordhöhe [m]  $H_s$  = signifikante Wellenhöhe [m]  
 $A_{98}$  = Wellenaufbauhöhe [m]  $T$  = Wellenperiode (*regelm. Welle*) [s]  
 $\alpha$  = Böschungsneigung [°]  $T_m$  = mittlere Wellenperiode [s]  
 $L$  = Wellenlänge am Bauwerksfuß [m]  $g$  = Erdbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $L_0$  = Wellenlänge im Tiefwasser [m]

## 2.4.2 Berechnungsansätze auf der Grundlage der „Wehrformel“

In Analogie zur stationären Überfallströmung bei Stauanlagen kann die POLENI-Gleichung

$$q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} h_{\ddot{u}}^{3/2} \quad (2.9)$$

mit:  $h_{\ddot{u}}$  = Überfallhöhe [m]  
 $\mu$  = Überfallbeiwert [-]

auch für den instationären Überlaufvorgang sinusförmiger Wellen (*Kikkawa et al.*, 1968; *Rong-Chung*, 1972; *Umeyama*, 1993) oder von Einzelwellen (*Özhan u. Yalçiner*, 1990) verwendet werden, wenn statt der Überfallhöhe  $h_{\ddot{u}}$  im Oberwasser die Energiehöhenfunktion  $E(t)$  vor dem Bauwerk als Funktion der Zeit bekannt ist:

$$\begin{aligned} q(t) &= \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} (E(t) - R_C)^{3/2} && \text{für } E(t) > R_C \\ q(t) &= 0 && \text{für } E(t) \leq R_C \end{aligned} \quad (2.10)$$

Die Energiehöhenfunktion  $E(t)$  stellt eine Energiehöhe dar, die sich aus der Wasserspiegelauslenkung  $\eta(t)$  und der kinetischen Energiehöhe zusammensetzt. Die kinetische Energiehöhe wird aus der über die Wassertiefe integrierten Strömungsgeschwindigkeit  $U$  ermittelt:  $E(t) = \eta(t) + U^2/(2g)$ . In zahlreichen Untersuchungen wird jedoch der kinetische Energieanteil  $U^2/(2g)$  vernachlässigt.

Durch Integration von Gl. (2.10) über die Wellenperiode  $T$  kann das Überlaufvolumen  $V$  einer individuellen Welle bestimmt werden. In ihrer Anwendung ist Gl. (2.10) weder analytisch lösbar noch auf Modellversuche übertragbar, da die Energiehöhenfunktion  $E(t)$  an der seeseitigen Bauwerkskrone nicht ausreichend bekannt ist. Vorhandene Ansätze, die auf dieser Methode aufbauen, definieren daher die Energiehöhenfunktion  $E(t)$  z.B. als Sinusfunktion mit der Amplitude  $k_{\ddot{u}} \cdot H_0$ , wobei der Faktor  $k_{\ddot{u}}$  empirisch zu bestimmen ist.  $k_{\ddot{u}}$  ist eine Funktion des Bauwerkstyps und der Wellensteilheit  $s$  (z.B. *Oumeraci et al.*, 1999b).

Aufgrund der bisherigen Vorgehensweise kann die genaue Energiehöhenfunktion  $E(t)$  nicht ermittelt werden, da lediglich eine empirisch kalibrierte Einheitsfunktion (z.B.  $E(t) = k_{\ddot{u}} \cdot \sin(\omega t)$ ) zugrundegelegt wird. Daher können die Geschwindigkeiten und Schichtdicken auf der Deichkrone anhand bisheriger Untersuchungen auf der Grundlage der Wehrformel auch nicht hergeleitet werden.

### 2.4.3 Indirekte Berechnungsansätze aus dem „Wellenauflaufkeil“

Hier sollen Untersuchungen diskutiert werden (*Nagai u. Takada*, 1970; *Cross u. Sollitt*, 1972; *Roos u. Battjes*, 1976; *Tautenhain*, 1981; *Yamamoto u. Horikawa*, 1992), bei denen die Wellenüberlaufrate  $q$  indirekt aus dem Wellenauflaufkeil berechnet wird. Kern des Verfahrens ist die Annahme, daß das Wasservolumen im Wellenauflauf oberhalb der Kronenhöhe  $R_C$  einer fiktiv verlängerten Böschung gleich dem Überlaufvolumen  $V$  einer individuellen Welle ist. Bei dieser Betrachtung werden der Einfluß des Wellenüberlaufes auf die Reflexion der Böschung und die Wechselwirkung zwischen ablaufender und auflaufender Welle nicht berücksichtigt. Diese Interaktion zwischen auf- und ablaufender Welle führt i.d.R. zu kleineren Brecherkennzahlen, zu einer landwärtigen Verlagerung des Brechpunktes und zu einer Erhöhung der brechenden Welle. Eine Erklärung hierfür sind die geringeren "bremsenden" Kräfte infolge der Wellenablaufgeschwindigkeiten.

Weiterhin stellt die praktische Umsetzung des Verfahrens aufgrund der erforderlichen Kenntnis der Schichtdicken und Geschwindigkeiten in der Auflaufzunge einen Nachteil bei der Anwendung dieser Methode dar. So ist noch unzureichend geklärt, welches Keilvolumen der Auflaufzunge oberhalb der Kronenhöhe für die Wellenüberlaufmenge wirksam wird. *Nagai u. Takada*, *Cross u. Sollitt*, *Roos u. Battjes* und *Yamamoto u. Horikawa* verwenden alle das Volumen oberhalb der horizontalen Verlängerung der Kronenhöhe (Abb. 2.6a). *Roos u. Battjes* und *Tautenhain* verwenden dagegen einen böschungsnormalen Schnitt (Abb. 2.6b). Eine physikalische Begründung, warum Wasserteilchen seewärts der Deichkrone noch über das Bauwerk laufen sollen, existiert aber nicht. Die Verwendung einer physikalisch sinnvollerer Volumenermittlung senkrecht zur Deichkrone (Abb. 2.6c) ergibt jedoch zu kleine Wellenüberlaufmengen (*Roos u. Battjes*). Ein horizontaler Schnitt (Abb. 2.6a) führt zwar zu scheinbar korrekten Ergebnissen (*Nagai u. Takada*), die physikalische Plausibilität ist aber nicht gegeben. Eine Überprüfung der drei Methoden zur Volumenermittlung hat gezeigt, daß

- kein signifikanter Unterschied in der Volumenermittlung bei einer Ermittlung des Auflaufvolumens senkrecht zur Deichkrone (Abb. 2.6.c) und senkrecht zur Deichaußenböschung (Abb. 2.6.b) besteht. Es gilt:  $\Delta V = (V_2 - V_3) / V_2 = n \cdot c_2 \cdot \sin^3 \alpha \approx 0$  (mit  $c_2$  s. Abschnitt 2.3.2)
- auch der Unterschied zwischen einer Volumenermittlung entsprechend Abb. 2.6.a und 2.6.b geringer als 1% ist ( $\Delta V = (V_1 - V_2) / V_2 = c_2 \cdot \sin \alpha$ ) (mit  $c_2$  s. Abschnitt 2.3.2).
- Ein Schnitt senkrecht zur Deichaußenböschung zu einer Unterschätzung der Wellenüberlaufrate von mindestens 30% führt (Abb. 2.6.b). Unter Berücksichtigung von Gl. (4.52a) gilt:

$$\frac{q(\text{Gl.4.52a})}{q(V_2)} = 0,675 \cdot n \cdot \sin \alpha \left( 1 - \frac{R_C}{A} \right)^{b-2} \quad (2.11)$$

Direkt anwendbar auf die Strömungsbelastung ist das Verfahren nur in Kombination mit der Entwicklung der Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung (s. Abschnitt 2.3), um neben dem Auflaufvolumen auch die Geschwindigkeitsverteilung zu berücksichtigen. Daher besitzt dieses Verfahren im folgenden keine weitere Bedeutung.

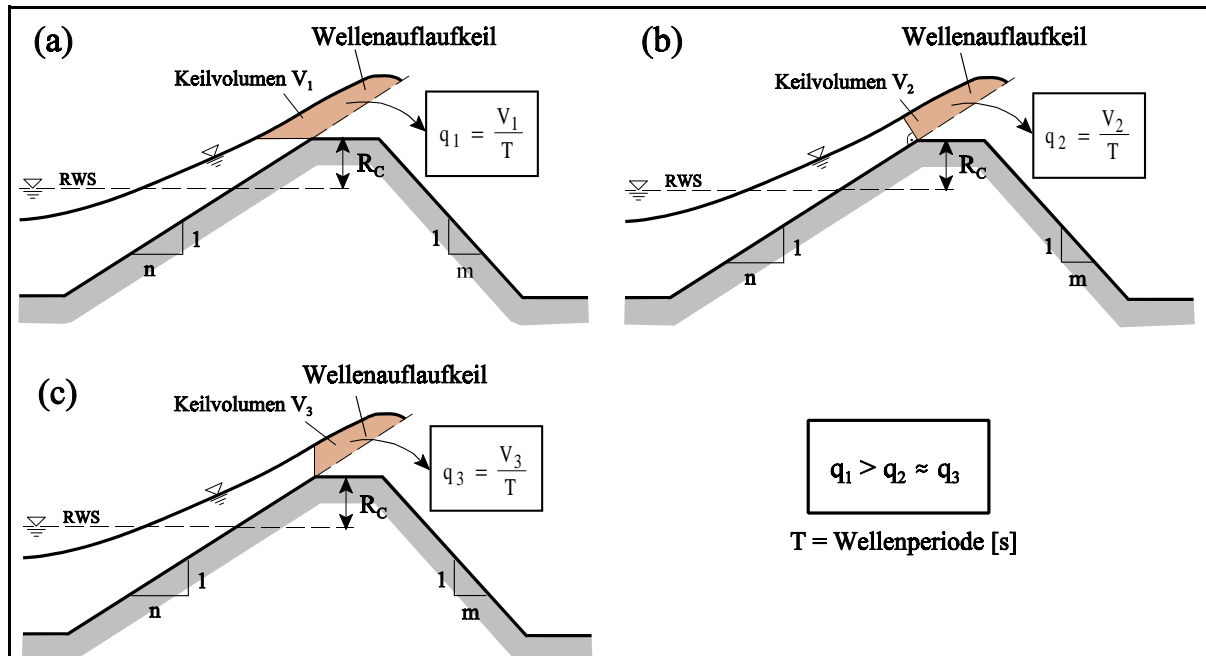


Abb. 2.6: Bestimmung des Wellenüberlaufvolumens aus dem Wellenauflaufvolumen

#### 2.4.4 Numerische Modelle

Zunehmende Bedeutung bei der Beschreibung von hydraulischen Prozessen in der Brandungszone und in der Auflaufzone (Wellenbrechen, Wellenauflauf und Wellenüberlauf) gewinnen numerische Modelle auf Grundlage von Finiten Differenzen (FDM) und Finiten Volumen (FVM). Ihr Vorteil gegenüber physikalischen Modellen liegt in dem schnelleren und kostengünstigeren Einsatz und der Flexibilität der Randbedingungen (Geometrie, Wellen). Ihr Nachteil besteht in den Schwierigkeiten bei der exakten Beschreibung der hochkomplexen Strömungsprozesse in der Brandungs- und Auflaufzone, insbesondere des Wellenbrechens. Der Wellenauflaufvorgang wird als Bore auf einer Böschung beschrieben (Hibberd u. Peregrine, 1979). Dies bedeutet, daß der eigentliche Brechvorgang und die resultierende Energiedissipation nur unzureichend simuliert werden. Dies gilt auch für die hochturbulenten und instationären Vorgänge beim Wellenauflauf und Wellenüberlauf selber, die zusätzlich vom Zweiphasen-Gemisch „Wasser-Luft“ geprägt werden. Diese Aspekte sind bislang noch unzureichend geklärt, wie im folgenden an einem Vergleich experimentell und numerisch ermittelter Wellenüberlauraten und Schichtdicken gezeigt wird.

Für Seedeiche wurden numerische Modelle von Wurjanto (1988) bzw. Kobayashi u. Wurjanto (1989, FDM), Van Gent (1995, FDM, VOF) und Dodd (1998, FVM) entwickelt. Das FDM-

Modell ODIFLOCS V. 2.03 (Van Gent, 1995) stand im Rahmen dieser Arbeit für einen Vergleich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen zur Verfügung. Die Kalibrierung von ODIFLOCS wird ausführlich bei Oumeraci *et al.* (1999c) beschrieben. Für einen Vergleich zwischen ODIFLOCS und den eigenen Modelluntersuchungen wurden neben der mittleren Wellenüberlaufrate  $q$  auch die Überlaufgeschwindigkeiten  $v_K$  sowie die mittlere Wasserüberdeckung  $\bar{h}_K$  ausgewählt, die jeweils maßgebend für die Erosion und die Infiltration eines Deiches sind (s. Abschnitt 1). Die Definition der Parameter  $v_K$  bzw.  $\bar{h}_K$  ist in Abschnitt 3.4 dargestellt.

**(a) Mittlere Wellenüberlaufraten**

Ein Vergleich zwischen experimentell gemessenen ( $q_{\text{exp}}$ ) und berechneten ( $q_{\text{num}}$ ) mittleren Wellenüberlaufraten ist in Tab. 2.5 für verschiedene Untersuchungen dargestellt. Für *regelmäßige Wellen* liegen die numerisch gerechneten Wellenüberlaufraten zwischen 83% und 99% der experimentell ermittelten Wellenüberlaufraten, für *Wellenspektren* zwischen 82% und 92%. Dies bedeutet eine systematische Unterschätzung der mittleren Wellenüberlaufraten durch die verfügbaren numerischen Modelle.

**Tab. 2.5:** Vergleich numerische Modelle - physikalische Modellversuche für mittlere Wellenüberlaufraten  $q$

Vergleich zwischen		$\frac{q_{\text{num.}}}{q_{\text{exp.}}} \quad [-]$	$\sigma' \quad [\%]$	Bauwerk (Neigung)	Quelle
Num. Modell	Experiment				
Wurjanto (FDM)	Saville ( <i>regelm. Wellen</i> )	0,83	54%	Deckwerk (1:3; 1:1,5)	Kobayashi u. Wurjanto, 1989
Dodd (FVM)	Saville ( <i>regelm. Wellen</i> )	0,92	68%	Deckwerk (1:3; 1:1,5)	Dodd, 1998
ODIFLOCS (FDM)	eigene Arbeit ( <i>regelm. Wellen</i> )	0,99	44%	Deich (1:6)	s. Anlage B
ODIFLOCS (FDM)	eigene Arbeit ( <i>Wellenspektren</i> )	0,92	34%	Deich (1:6)	s. Anlage B
Dodd (FVM)	Dodd ( <i>Wellenspektren</i> )	0,82	39%	Deich (1:4)	Dodd, 1998

**Anmerkung:** Für den Vergleich mit den Untersuchungen von Saville (1955) standen Wurjanto (1988) bzw. Dodd (1998) insgesamt 20 Modellversuche zur Verfügung. Für den Vergleich mit ODIFLOCS wurden 45 Versuche mit *regelmäßigen Wellen* und 18 Versuche mit *Wellenspektren* verwendet (s. Anlage B). Der Reibungsbeiwert  $f$  wurde für die ODIFLOCS-Rechnungen zu  $f=0$  gewählt.

**(b) Schichtdicken**

Im Rahmen dieser Arbeit sind zwei verschiedene Schichtdickenparameter von Bedeutung: die mittlere Wasserüberdeckung  $\bar{h}$  als maßgebender Parameter für die Infiltration sowie die Schichtdicke  $h$  als maximale lokale Schichtdicke während eines Überlaufereignisses. Daher wird im folgenden ein Vergleich zwischen den experimentell und numerisch ermittelten Schichtdicken am Ende der Deichkrone ( $x_K=B$ ) durchgeführt. Entsprechende Untersuchungen aus dem Schrifttum sind nicht bekannt. Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen kann gezeigt werden, daß die Schichtdicken am Ende der Deichkrone ( $x_K=B$ ) im numerischen Modell für *regelmäßige Wellen* um bis zu 15% höher als die experimentell ermittelten Schichtdicken sind. Für *Wellenspektren* haben sich sehr große Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Schichtdicken ergeben.

**Tab. 2.6:** Vergleich numerische Modelle - physikalische Modelle für mittlere Schichtdicken und mittlere Wasserüberdeckung  $\bar{h}_K$  am Ende der Deichkrone

	Vergleich zwischen:		$\frac{h_{K,num.}}{h_{K,exp.}}$ [-]	$\sigma'$ [%]
	num. Modell	Experiment		
$h_K$	ODIFLOCS (FDM)	eigene Arbeit ( <i>regelm. Wellen</i> )	1,15	49
		eigene Arbeit ( <i>Wellenspektren</i> )	0,23	30
$\bar{h}_K$	ODIFLOCS (FDM)	eigene Arbeit ( <i>regelm. Wellen</i> )	1,08	54
		eigene Arbeit ( <i>Wellenspektren</i> )	0,41	61

**(c) Geschwindigkeiten**

Abschließend soll hier ein Vergleich für die Überlaufgeschwindigkeiten  $v_K$  am Beginn der Deichkrone ( $x_K=0$ ) dargestellt werden. Auch hier soll wieder in mittlere Geschwindigkeiten  $\bar{v}_K$  und Überlaufgeschwindigkeiten  $v_K$  unterschieden werden. Dabei zeigt sich, dass die Überlaufgeschwindigkeiten  $v_K$  im numerischen Modell nahezu doppelt so hoch wie die gemessenen Überlaufgeschwindigkeiten sind.

**Tab. 2.7:** Vergleich numerische Modelle - physikalische Modelle für Überlaufgeschwindigkeiten  $v_K$  und mittlere Geschwindigkeiten  $\bar{v}_K$

	Vergleich zwischen:		$\frac{v_{K,num.}}{v_{K,exp.}}$ [-]	$\sigma'$ [%]
	num. Modell	Experiment		
$v_K$	ODIFLOCS (FDM)	eigene Arbeit ( <i>regelm. Wellen</i> )	2,09	52
		eigene Arbeit ( <i>Wellenspektren</i> )	2,62	34
$\bar{v}_K$	ODIFLOCS (FDM)	eigene Arbeit ( <i>regelm. Wellen</i> )	1,14	37
		eigene Arbeit ( <i>Wellenspektren</i> )	1,98	81

#### 2.4.5 Zusammenfassung und kritische Bewertung

Zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der Bestimmung der mittleren Wellenüberlaufrate  $q$  liegen im Schrifttum vor, die in vier Gruppen klassifiziert wurden (empirische Verfahren, Verfahren auf Grundlage der Wehrformel, Überlaufberechnung aus dem Wellenauflaufkeil, numerische Methoden).

Während insbesondere die empirischen Verfahren aufgrund ihrer einfachen Anwendbarkeit zur Ermittlung mittlerer Wellenüberlaufraten häufig verwendet werden, verlieren Verfahren auf Grundlage der Wehrformel und einer Volumenermittlung aus dem Auflaufkeil zunehmend an Bedeutung, da ihre Anwendbarkeit von zahlreichen Randbedingungen und Annahmen abhängt. Außerdem werden auch diese Verfahren abschließend empirisch kalibriert. Numerische Modelle werden dagegen in Zukunft an Bedeutung gewinnen, unterschätzen jedoch noch die mittleren Wellenüberlaufraten um bis zu 20% und zeigen bis zu 100% Abweichungen in den Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten. Hier ist erheblicher Forschungsbedarf vorhanden, um auch die numerischen Modelle für die Ermittlung des Strömungsfeldes im Wellenüberlauf einsetzen zu können. Allerdings stellen numerische Verfahren die bislang einzige Möglichkeit zur näherungsweisen Ermittlung von Schichtdicken und Geschwindigkeiten im Überlaufschwall dar.

## 2.5 Präzisierung der Zielsetzung und Methodik

In den Abschnitten 2.3 und 2.4 wurde gezeigt, dass Untersuchungen zur Beschreibung des Strömungsfeldes im Wellenüberlauf bislang nicht vorliegen. Ziel dieser Arbeit ist es, Ansätze zur Beschreibung dieses Strömungsfeldes auf theoretischer und experimenteller Grundlage zu entwickeln. Dazu werden im folgenden alle Einflußfaktoren auf den Wellenüberlauf bestimmt. Da eine experimentelle Variation aller Einflußfaktoren nicht praktikabel ist, werden zuerst die weniger relevanten Faktoren ermittelt und ihr Einfluß auf den Wellenüberlauf diskutiert. Auf diese Weise werden Zielsetzung und Methodik weiter präzisiert.

### 2.5.1 Abgrenzung der Thematik

Die bisherige Arbeit hat gezeigt, dass Wellenaufbau und Wellenüberlauf von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden (Tab. 2.8). Da eine Berücksichtigung aller Faktoren im Rahmen experimenteller Untersuchungen nicht praktikabel ist, werden die unberücksichtigten bzw. nicht variierten Faktoren (*kursiv* in Tab 2.8) im folgenden kurz diskutiert und deren Abgrenzung begründet.

Tab. 2.8: Einflußfaktoren auf den Wellenauf- und Wellenüberlauf

Vorland- und Deichparameter	Seegang	Eigenschaften des Wassers	sonstige
<b>seewärtige Deichneigung</b> <b>landwärtige Deichneigung</b> <i>variable Deichneigung (z.B. Knick)</i> <i>Berme</i> <i>Vorstrandneigung</i> <i>Rauheitselemente</i> <i>Grasdecke, Bewuchs</i> <i>Kronenbreite</i> <i>Kronenhöhe</i> <i>Kronenmauer</i> <i>Durchlässigkeit</i>	<b>Wellenhöhe</b> <b>Wellenperiode</b> <b>Wellenspektrum</b> <i>Wellenangriffswinkel</i> <i>Kurzkämmigkeit</i>	<i>Dichte</i> <i>Salzgehalt</i> <i>kin. Viskosität</i> <i>Oberflächenspannung</i> <i>Temperatur</i> <i>Kompressibilität</i> <i>Luftgehalt</i>	<b>Wasserstand</b> <i>Strömungen</i> <i>Wind</i> <i>Maßstabeffekte</i> <i>Modelleffekte</i> <i>Erdbeschleunigung</i>

(\*) Fettgedruckte Faktoren werden im Rahmen dieser Arbeit experimentell variiert.

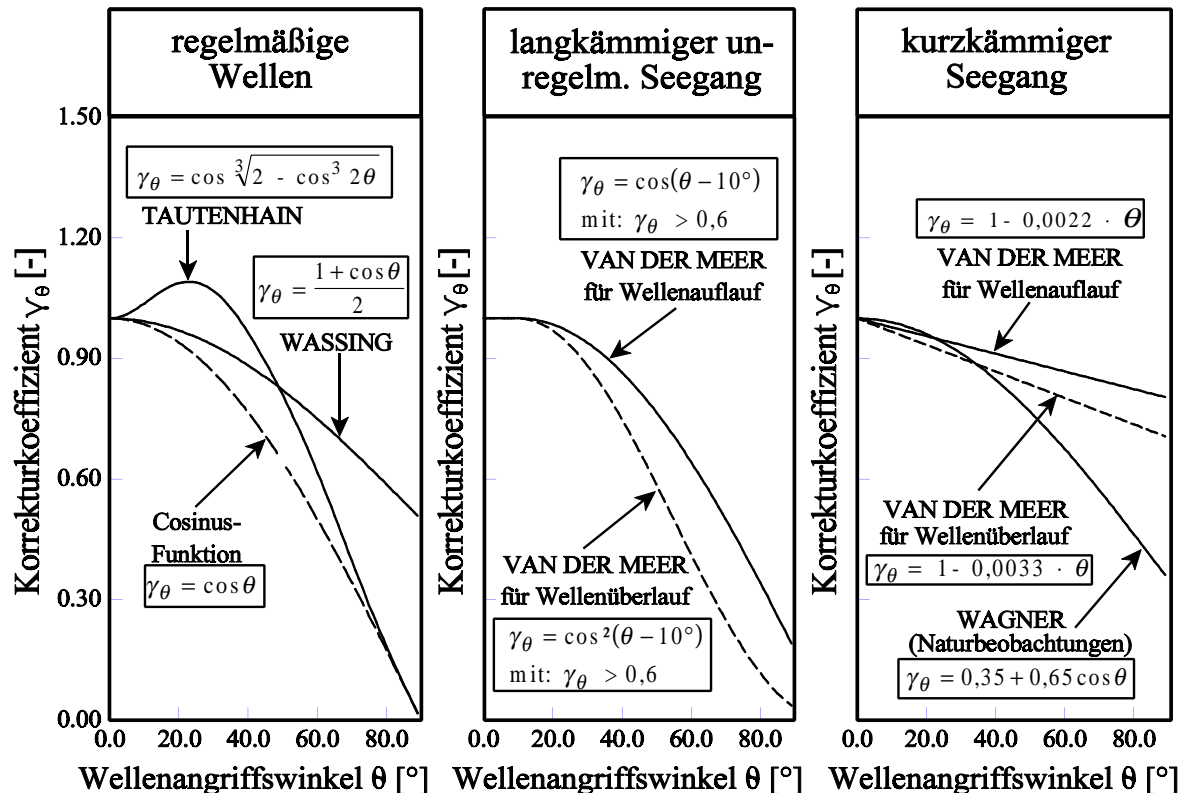
Bei der Vorgehensweise wird unterschieden in Faktoren, die den Seegang, das Wellenbrechen, den Wellenaufbau und den Wellenüberlauf beeinflussen.

#### (a) Einflußfaktoren auf den Seegang

Zu den seegangsbeeinflussenden Faktoren gehören die Vorstrandneigung, der Wellenangriffswinkel, die Form des Wellenspektrums und die Richtungsstruktur des Seegangs, Strömungen sowie die Wellendeformation durch Windeinfluß. Während der Einfluß der Vorstrandneigung auf die Höhe der brechenden Welle (Goda, 1985) ausreichend genau



bestimmt werden kann, zeigen die Ergebnisse zum Einfluß des Wellenangriffswinkels deutliche Unterschiede. Der Einfluß des Wellenangriffswinkels auf den Wellenauflauf / Wellenüberlauf ist vermutlich vom Seegangstyp abhängig, da Versuche mit *regelmäßigen Wellen* und langkämmigem Seegang eine Erhöhung von Wellenauflaufhöhe und Wellenüberlauftrate bei kleinen Wellenangriffswinkeln ( $5^\circ < \theta < 30^\circ$ ) gegenüber küstennormalen Wellenangriff ( $\theta = 0^\circ$ ) zeigen. Dagegen weisen Experimente mit kurz-kämmigem Seegang keine Erhöhung auf (Abb. 2.7).



**Abb. 2.7:** Änderung von Wellenauflauf und Wellenüberlauf bei schrägem Wellenangriff  
(Wellenauflauf:  $A_{(\theta>0^\circ)} = \gamma_\theta \cdot A_{(\theta=0^\circ)}$ ; Wellenüberlauf:  $R_{C,(\theta>0^\circ)} = R_{C,(\theta=0^\circ)} / \gamma_\theta$ )

Die Form des Wellenspektrums bzw. die daraus resultierende Abfolge einzelner Wellenaufläufe können zu einer Reduktion aber auch zu einer Steigerung der Wellenauflaufenergie infolge der Überlagerung mehrerer Wellenaufläufe führen (Sauer, 2000). Da die Spektralform stark von der Vorstrandtopographie geprägt wird (Vorländer, Wattgebiete, vorgelagerte Inseln), kann in dieser Arbeit aus praktischen Gründen nur mit theoretischen Spektren gearbeitet werden.

Der Einfluß des Windes bewirkt eine Wellendeformation (Iwagaki et al., 1966; Waal, 1996) und führt zu Gischtentstehung (Hashida et al., 1996; Waal, 1996). Gischt wird durch Wind transportiert und hat somit im Sinne dieser Arbeit keine unmittelbar bauwerksbelastende Wirkung. Der Windeinfluß auf die Wellendeformation ist bei geringen

Windstärken vernachlässigbar und kann aufgrund der fehlenden Einrichtungen und der Schwierigkeiten bei der Skalierung des Windes (Windgeschwindigkeit, Schubspannung Luft-Wasser, Wassertropfen) auch für hohe Windstärken im Rahmen dieser Arbeit nicht erfaßt werden.

**(b) Einflußfaktoren auf das Wellenbrechen**

Zu den Faktoren, die das Wellenbrechen beeinflussen, gehören u.a. eine Berme unter dem Sturmflutwasserstand und der Wind. Eine entsprechend hohe Berme zwingt die ankommenden Wellen zu brechen, so dass nur noch gebrochene oder nichtbrechende Wellen kleiner Höhe die eigentliche Deichböschung erreichen. Bermen sind für die Deutsche Nordseeküste eher untypisch und ansonsten in Höhe und Breite so vielfältig, dass sie im Rahmen dieser grundlegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden können. Hierfür sind spezielle Untersuchungen erforderlich, die den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würden. Den Einfluß von Bermen auf die mittlere Wellenüberlaufrate  $q$  beschreiben z.B. *Van der Meer et al.* (1995, 1998).

Wind führt zu einem früheren Wellenbrechen (max. 20 bis 30% größere Brechwassertiefe  $d_B^{2.6.})$  und damit zu einer Verschiebung des Brechertyps zum Schwallbrecher. Dies bedeutet eine geringere Belastung der Deichoberfläche und geringere Wellenüberlaufraten. Der Windeinfluß auf das Wellenbrechen konnte aufgrund der bereits unter (a) erwähnten Gründe (Skalierung des Windes, fehlende Einrichtungen) im Rahmen dieser Arbeit experimentell nicht berücksichtigt werden.

**(c) Einflußfaktoren auf den Wellenauflauf**

Der Wellenauflaufvorgang selber wird im wesentlichen durch die Deichneigung und die Deichrauhigkeit beeinflusst. Die vorliegenden Modellversuche wurden für glatte Deichoberflächen durchgeführt (z.B. Asphaltböschung, Grasdecke). Für diese Oberflächen kann der Korrekturkoeffizient  $\gamma_f$  zu 1,0 gesetzt werden (Def.:  $A_{\text{rauh}} = \gamma_f \cdot A_{\text{glatt}}$ ). Der Einfluß rauher Oberflächen (z.B. Blocksteine, Schüttsteine;  $\gamma_f < 1,0$ ) wurde in zahlreichen Modelluntersuchungen bestimmt (z.B. *Franzius*, 1965; *Schulz*, 1992; *Szmytkiewicz et al.*, 1994) und soll hier nicht erneut behandelt werden.

---

2.6.) *Douglass* (1989) empfiehlt folgende Gleichung für die Abschätzung der Brechwassertiefe  $d_B$  mit Wind:

$$\frac{d_B(\text{mit Wind})}{d_B(\text{ohne Wind})} = \left( 1 + 0,03 \frac{U_{10}}{d_B(\text{ohne Wind})} \right)^2$$

mit:  $U_{10}$  = Windgeschwindigkeit in 10m Höhe über dem RWS.

Der Wellenaufschwall wird durch den Wind zusätzlich angetrieben (Ward *et al.*, 1996). Bei großen Wassermassen (Waal, 1996) bzw. geringen Windgeschwindigkeiten (Ward *et al.*, 1996) ist sein Einfluß jedoch vernachlässigbar. Dagegen kann der Einfluß hoher Windgeschwindigkeiten auf geringe Wellenüberlaufmengen eine Zehnerpotenz annehmen.

**(d) Einflußfaktoren auf den Wellenüberlauf**

Zu den Faktoren, die den Wellenüberlauf beeinflussen, gehören die Kronenbreite  $B$ , die Rauheit der Binnenböschung sowie konstruktive Maßnahmen wie z.B. Kronenmauern und Wellenumlenker. Yuan (1955) und Juhl u. Sloth (1994) zeigen, dass eine zunehmende Kronenbreite bei einem durchlässigen geschütteten Wellenbrecher zu einer Reduktion der mittleren Wellenüberlauftrate  $q$  führt. Der Einfluß der Kronenbreite  $B$  ist aber geringer als der von Wellenhöhe  $H$  oder Freibordhöhe  $R_C$ . Sloth u. Juhl (1995) zeigen für geschüttete Wellenbrecher, dass die Kronenbreite  $B$  einer Erhöhung der Freibordhöhe  $R_C$  um  $0,17 \cdot B$  entspricht. Da die Kronenbreite von Seedeichen in der Praxis nur geringen Veränderungen ( $B = 2,0$  bis  $3,0\text{m}$ ) unterliegt und zudem undurchlässig ist, wird sie hier bewusst konstant gehalten.

**(e) sonstige Einflußfaktoren**

Im Rahmen dieser Arbeit soll keine Deichüberströmung infolge eines extrem hohen Wasserstandes oberhalb der Bauwerkskrone behandelt werden. Dieser Fall kann mit den vorhandenen hydromechanischen Formeln wie der Poleni-Gleichung gut erfaßt werden (Oumeraci *et al.*, 1999b). Auch werden hier keine durchlässigen Bauwerksflächen betrachtet, wie sie z.B. bei geschütteten Wellenbrechern vorkommen, da eine Deichoberfläche für den Wellenauflauf und Wellenüberlauf als undurchlässig angesehen werden kann (Durchlässigkeit der Kleiabdeckung:  $k_f \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$ ). Weitere Einflußfaktoren wie die Dichte des Wassers, die Wassertemperatur, die Oberflächenspannung, die Kompressibilität, der Luft- und Salzgehalt, die kinematische Viskosität sowie die Erdbeschleunigung sind von untergeordneter Bedeutung und werden hier nicht weiter behandelt. Auf Modell- und Maßstabeffekte wird in Abschnitt 3.1 eingegangen.

## **2.5.2 Präzisierung der Zielsetzung und Methodik**

Beim Überlaufschwall über ein Bauwerk kommt es zu einer Trennung der Strömung in Überlauf- und Wellenrücklaufströmung und somit zu zwei Strömungsfeldern, die getrennt voneinander behandelt werden müssen. Hier versagen die bislang vorliegenden analytischen Verfahren. Numerische Methoden können den Wellenüberlauf zwar berechnen, weisen aber immer noch deutliche Abweichungen zu den Ergebnissen von Modellversuchen auf.

Die Analyse des Schrifttums zum gegenwärtigen Wissensstand hat gezeigt, dass zur Bestimmung der Wellenaufbauhöhe  $A$  bzw.  $A_{0g}$  und der mittleren Wellenüberlaufgeschwindigkeit  $q$  zahlreiche Untersuchungen vorliegen. Der Kenntnisstand zum Verlauf der Schichtdicken bzw. der Aufbaugeschwindigkeiten beschränkt sich dagegen auf wenige Ansätze zur Ermittlung der Mittelwerte ( $h_A$  bzw.  $v_A$ ) auf der Deichaußenböschung. Erweiterungen für die Deichkrone und die Deichinnenböschung fehlen bislang vollständig. Ansätze zur Beschreibung der physikalischen Prozesse auf der Deichkrone und der Deichinnenböschung sind jedoch erforderlich, um die Interaktion zwischen hydrodynamischen und bodenmechanischen Prozessen beschreiben zu können. Um diese Lücke im Wissensstand zu schließen, wird folgende Vorgehensweise hinsichtlich der Beschreibung der für den Wellenüberlauf relevanten Prozesse und der dazugehörigen Parameter angestrebt (Abb. 2.8):

**(a) Bestimmung der „Randbedingungen“ für das Strömungsfeld im Wellenüberlauf**

- *Brechpunkt und Brechertyp:*

Brechpunkt und Brechertyp sind wichtige Parameter zur Beschreibung des Wellenaufbau- bzw. Wellenüberlaufprozesses (Tab. 2.1). Eine Klassifikation der Brechertypen auf Grundlage der Brecherkennzahl  $\xi_d$  ist erforderlich, da Wellenüberlauf das Brechverhalten beeinflusst und die bestehende Klassifikation, die für flache Neigungen ohne Wellenüberlauf aufgestellt wurde, nicht ohne weitere Prüfung übernommen werden kann.

- *Wellenaufbauhöhe:*

Wellenüberlauf findet nur statt, wenn die Kronenhöhe  $R_C$  kleiner als die Wellenaufbauhöhe  $A$  ist. Daher stellt die Wellenaufbauhöhe eine wichtige Randbedingung zur Abgrenzung des Strömungsfeldes im Wellenüberlauf dar.

- *mittlere Wellenüberlaufgeschwindigkeit:*

Die mittlere Wellenüberlaufgeschwindigkeit  $q$  ist als integraler Parameter aus Schichtdicke  $h$  und Überlaufgeschwindigkeit  $v$  über die Zeit  $t$  zur Überprüfung der Kontinuität erforderlich.

**(b) Bestimmung der Strömungsgrößen im Wellenüberlauf**

- *Schichtdicken auf der Deichaußenböschung, der Deichkrone und der Deichinnenböschung:*

Die Schichtdicken sind eine wichtige Größe zur Beschreibung der Überstauhöhe und damit der Infiltration in die Deichabdeckung. Für die Infiltration ist insbesondere die mittlere Wasserüberdeckung  $\bar{h}$  von Bedeutung, während die maximale Überstauhöhe eher durch die Schichtdicke  $h$  charakterisiert wird.

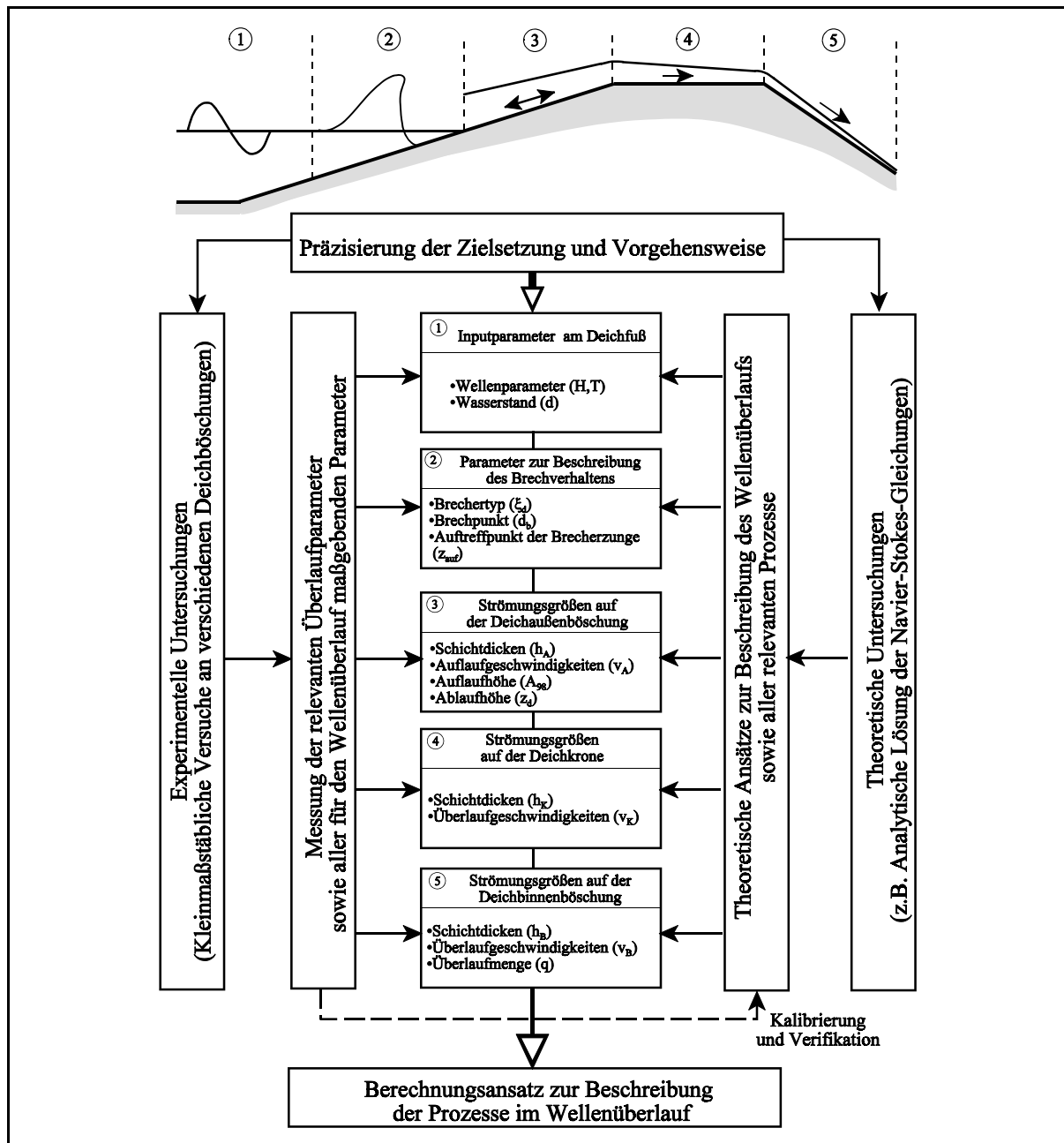


Abb. 2.8: Präzisierung der Vorgehensweise

- Strömungsgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung, der Deichkrone und der Deichinnenböschung:*

Zur Beschreibung der Erosion der Kleidecke eines Deiches sind die Strömungsgeschwindigkeiten des überlaufenden Wassers erforderlich. Dabei sind die Frontgeschwindigkeiten der auf- bzw. überlaufenden Welle für den Erosionsbeginn relevant, die als Auflauf- bzw. Überlaufgeschwindigkeit bezeichnet werden.

### 3. Experimentelle Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt sollen die Modellversuche dieser Arbeit beschrieben werden. Für die Planung der Modellversuche wurden zuerst die relevanten Maßstabseffekte abgeschätzt. Dies ist erforderlich, da die geringen Schichtdicken des Wellenüberlaufs u.U. von Maßstabseffekten beeinflusst werden. Daher ist die Übertragbarkeit der Modellergebnisse auf den Naturmaßstab zu untersuchen.

Anschließend werden Modellaufbau und Versuchsprogramm detailliert beschrieben. In diesem Zusammenhang wird auch ein Vergleich kennzeichnender dimensionsloser Parameter (z.B. Wellensteilheit, Brecherkennzahl, etc.) in der Natur und im Modell durchgeführt. Die dimensionslosen Parameter wurden auf der Grundlage einer Dimensionsanalyse ermittelt. Abschließend werden einige Anmerkungen zur Datenauswertung gegeben.

#### 3.1 Anmerkungen zu Maßstabseffekten

Obwohl es sich bei den vorliegenden hydraulischen Modellversuchen um Grundsatzuntersuchungen handelt, kann für die Übertragbarkeit auf die Natur ein geometrischer Modellmaßstab (geometrische Ähnlichkeit) von ca.  $1:N_L=1:10$  angenommen werden. Hydraulische Prozesse können nur dann auf die Natur übertragen werden, wenn neben der geometrischen Ähnlichkeit auch die dynamische und die kinematische Ähnlichkeit erfüllt sind. Letztere verlangt gleiche Zeitintervalle für geometrisch ähnliche Strecken im Modell und in der Natur und kann relativ einfach erfüllt werden. Die Erfüllung der dynamischen Ähnlichkeit, d.h. eines festen Verhältnisses aller Kräfte im Modell und in der Natur (Abb. 3.1), ist aufgrund der dafür erforderlichen gleichzeitigen Skalierung aller Flüssigkeitseigenschaften (Viskosität, Elastizität und Oberflächenspannung) in einem verkleinerten Modell unmöglich. Da Schwerekräfte und Trägheitskräfte an nahezu allen wellenüberlaufrelevanten Prozessen maßgeblich beteiligt sind, empfiehlt sich die Anwendung des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes.

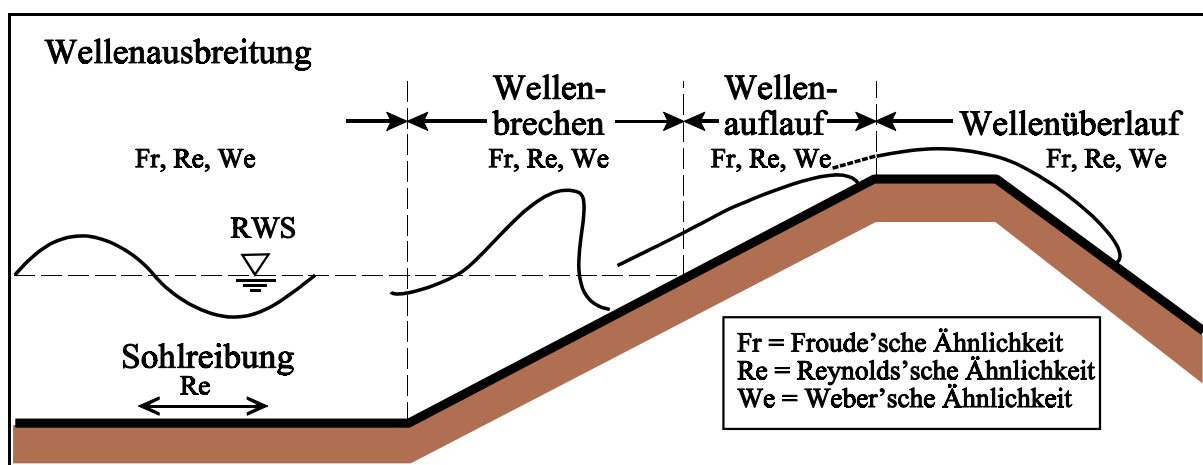


Abb. 3.1: Prozesse und relevante Modellgesetze für den Wellenauflauf und -überlauf

### 3.1.1 Einfluß der Oberflächenspannung

Bei zu kleinem Modellmaßstab hat die Oberflächenspannung einen Einfluß auf die Wellenausbreitung, das Wellenbrechen, den Wellenauflauf und den Wellenüberlauf. Dieser Einfluß soll im folgenden für die einzelnen Prozesse näher untersucht werden.

Der Einfluß der Oberflächenspannung  $\sigma_0$  auf die **Wellenausbreitung** ist von vernachlässigbarer Bedeutung für die hier vorliegenden Modellversuche. *Le Méhauté* (1976) zeigt auf der Grundlage der erweiterten Dispersionsgleichung ( $c$  = Wellenschnelligkeit):

$$c^2 = \left( \frac{g L}{2 \pi} + \frac{2 \pi \sigma_0}{L \rho_w} \right) \tanh \left( \frac{2 \pi d}{L} \right) \quad (3.1),$$

daß die Oberflächenspannung vernachlässigt werden kann, wenn die Wassertiefe  $d > 2,0 \text{ cm}$  und die Wellenperiode  $T > 0,35 \text{ s}$  sind. Diese Bedingungen sind im verwendeten Modell ständig erfüllt.

Der Einfluß der Oberflächenspannung auf das **Wellenbrechen** (stark gekrümmte Flächen, Luftaufnahme) sowie den Wellenauf- und Wellenablauf bzw. den Wellenüberlauf (geringe Schichtdicken) kann bei den vorliegenden Modellversuchen nicht ignoriert werden und müßte unter gleichzeitiger Erfüllung der Weberischen und Froudeschen Ähnlichkeit im Verhältnis von  $1/N_L^2$  modelliert werden, was allerdings praktische Probleme bereitet. Insbesondere für geringe Schichtdicken ( $h < 2,0 \text{ cm}$  (*Le Méhauté*, 1976)) kann daher die Oberflächenspannung nicht vernachlässigt werden und bewirkt für Schichtdicken  $h < 3,5 \text{ mm}$  ein Ausbleiben der Strömung (*Kolkman*, 1984). Versuche von *Miller* (1972) zeigen, daß eine Verringerung der Oberflächenspannung zu einer Erhöhung der brechenden Welle und einer landwärtigen Verschiebung des Brechpunktes führt. Zusätzlich wird das Wellenbrechen aufgrund der zu hohen Oberflächenspannung im Modell und der daraus resultierenden verminderten Luftaufnahme (*Führböter*, 1971) weiteren Maßstabeffekten unterworfen. Dies führt zu höheren Auflaufgeschwindigkeiten  $v_A$  auf glatten Böschungen im hydraulischen Modell (*Schulz*, 1992).

Um den Einfluß der Oberflächenspannung  $\sigma_0$  auf die **Auflauf- und Überlaufgeschwindigkeiten** abzuschätzen, werden folgende Überlegungen durchgeführt:

- Die Auflaufgeschwindigkeit kann nach Gl. (2.4) mit

$$v_A = k^* \sqrt{2 g A}$$

berechnet werden. Wie in Abschnitt 2.3 gezeigt wurde, ist  $k^*$  ein Maß für die Reibung und damit von der Reynolds-Zahl abhängig. Infolge der Oberflächenspannung  $\sigma_0$  erhöht sich die Auflaufhöhe  $A$  um den Betrag  $z_\sigma = \sigma_0 / (\rho_w g h_A)$ . Daraus folgt:

$$v_A = k^* \sqrt{2 g \left( A + \frac{\sigma_0}{\rho_W g h_A} \right)} \quad (3.2)$$

Gl. (3.2) beschreibt die Auflaufgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Viskosität (indirekt durch den Reibungsbeiwert  $k^*$ ) und der Oberflächenspannung  $\sigma_0$ .

- Durch Umformung und Substitution folgender Gleichungen  $h_A = c_2^* \cdot A$ ,  $Fr_A = v_A / (g \cdot h_A)^{1/2}$ ,  $We = (v_A^2 \cdot h_A \cdot \rho_W) / \sigma_0$  und Annahme einer idealen Flüssigkeit (keine Reibung  $\Rightarrow k^*=1$ ) folgt:

$$\frac{1}{2} = \left( \frac{1}{c_2^* Fr_A^2} + \frac{1}{We} \right) \quad (3.3)$$

Gl. (3.3) ist in Abb. 3.2 dargestellt und zeigt, daß der Einfluß der Oberflächenspannung für  $We > 10$  vernachlässigbar ist (Annahme:  $\sigma_0 = 0,073 \text{ N/m}$  für  $20^\circ\text{C}$ ). Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse für alle untersuchten Meßpositionen und Versuche zeigt, daß der Einfluß der Oberflächenspannung  $\sigma_0$  für Maximalwerte von Geschwindigkeit ( $v_A$ ) und Schichtdicke ( $h_A$ ) im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls vernachlässigt werden kann, da die Weber-Zahl  $We$  zwischen 30 und 3000 liegt.

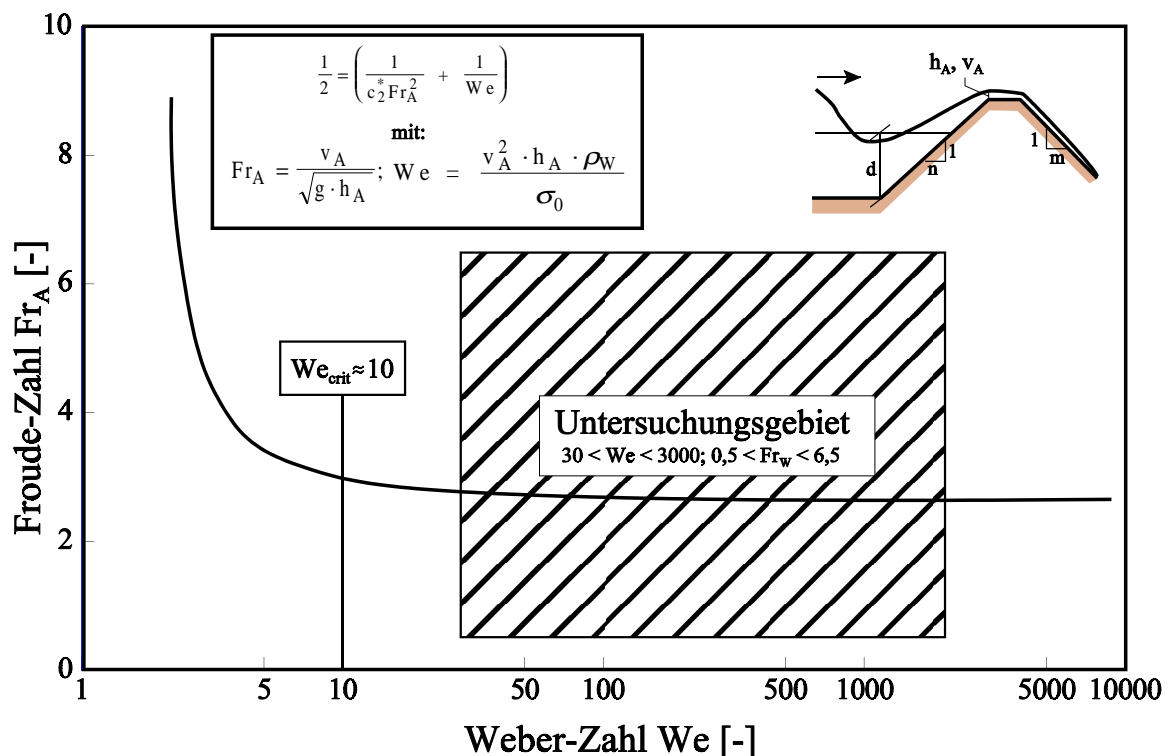


Abb.3.2: Einfluß der Oberflächenspannung  $\sigma_0$  auf die Überlaufströmung



### 3.1.2 Einfluß der kinematischen Viskosität

Im folgenden soll der Einfluß der kinematischen Viskosität auf die Wellenausbreitung, den Wellenaufbau und den Wellenüberlauf untersucht werden.

Biesel (1949) ermittelt den Einfluß der Viskosität  $\nu$  auf die **Wellenausbreitung** fortschreitender Wellen:

$$c = \left( 1 - \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right) \cdot \sqrt[4]{\frac{g L^3}{2\pi^3 \nu^2} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}} \right) \sqrt{\frac{g L}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (3.4)$$

Unter der Annahme der Flachwasserbedingung ( $\sinh(kd) \approx \tanh(kd) \approx (kd)$ ) und folgenden Ersetzungen  $c^2 = g \cdot d$ ;  $kd = (2\pi d/L)$ ;  $Fr_W^2 = c^2/(g \cdot d)$  und  $Re_W = (c \cdot d)/\nu$  folgt:

$$Fr_W^2 = \left[ 1 - \frac{1}{2 \sqrt{Re_W \cdot kd}} \right]^2 \quad (3.5)$$

Aus Abb. 3.3 ist ersichtlich, daß der Einfluß der Viskosität auf die Wellenausbreitung für die vorliegenden Modellversuche von vernachlässigbarer Bedeutung ist. Ein signifikanter Einfluß auf die Wellenausbreitung ist unterhalb  $Re_{W,crit} \approx 10^4$  vorhanden.

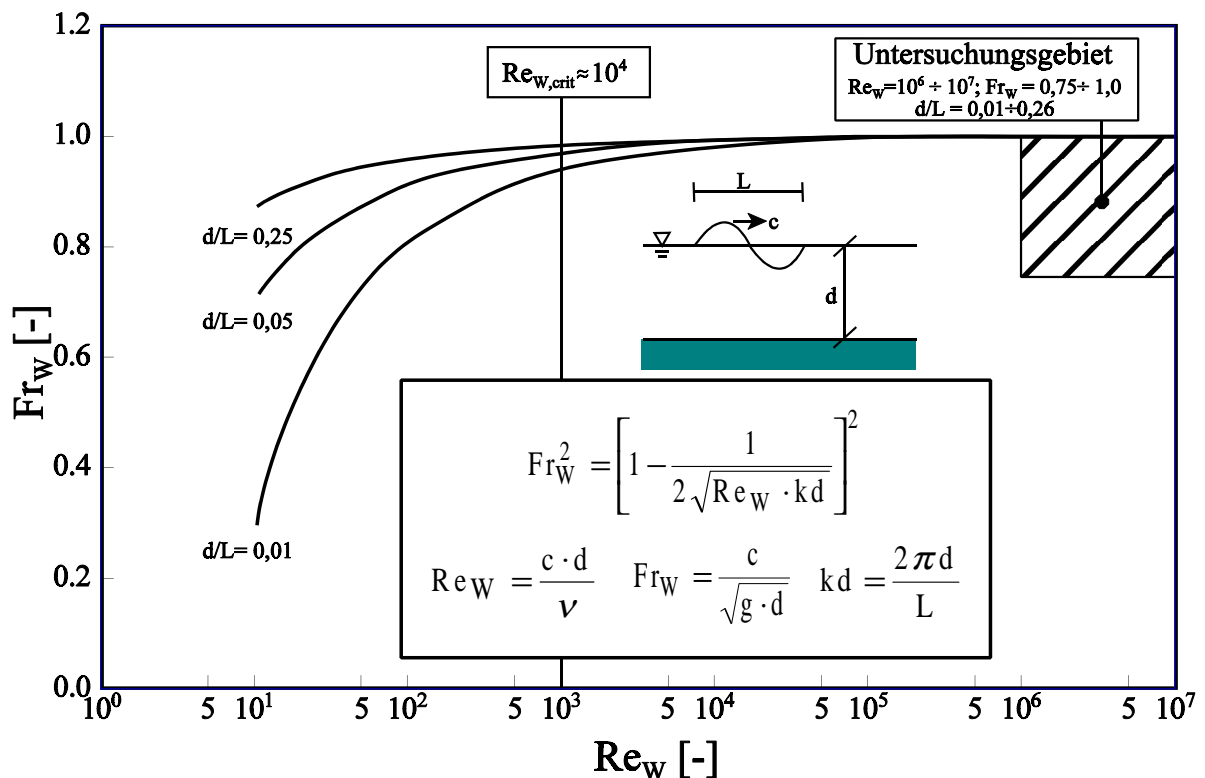


Abb. 3.3: Einfluß der kinematischen Viskosität  $\nu$  auf die Wellenausbreitung

Der Einfluß der kinematischen Viskosität ist von besonderer Bedeutung für den **Wellenauf- und Wellenüberlauf** und nimmt mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit zu, so daß eine hydraulisch raue Strömung insbesondere für kleine Wellenüberlaufmengen (geringe Schichtdicken) aufgrund der nicht ausgebildeten turbulenten Grenzschicht nicht mehr erfüllt ist. Dies bedeutet u.U. eine Verlagerung des Strömungsverhaltens in den hydraulisch glatten Bereich oder in den Übergangsbereich (*Schulz*, 1992). Beides ist mit höheren Widerstandsbeiwerten verbunden. Höhere Widerstandsbeiwerte haben höhere Energieverluste zur Folge. Dies wird auch durch Ergebnisse von Modelluntersuchungen in unterschiedlichen Maßstäben bestätigt. Kleinmaßstäbliche Modelluntersuchungen haben geringere Wellenaufauflhöhen (*Schulz*, 1992) bzw. geringere Wellenüberlaufmengen (*Kajima u. Sakakiyama*, 1994)<sup>3.1.)</sup> als im großmaßstäblichen Versuch ergeben. *Weggel* (1976) zeigt weiterhin, daß der Einfluß des Maßstabs für kleine Wellenüberlaufmengen zunimmt.

Im folgenden soll der Einfluß der kinematischen Viskosität  $\nu$  auf den Wellenauf- und Wellenüberlaufschwall für die Modellversuche dieser Arbeit untersucht werden.

Die Auflaufgeschwindigkeit der Wellenfront kann anhand von Gl. (2.4) bestimmt werden:

$$v_A = k \cdot \sqrt{2 g A} = \sqrt{\frac{1}{(1 - \alpha_k)}} \cdot \sqrt{2 g A}$$

Durch Umformung und Substitution der folgenden Gleichungen  $Fr_q = v_A / (2gA)^{1/2}$ ;  $\alpha_k = f \cdot A \cdot n / h_0$  ( $f$  = Reibungsbeiwert; Definitionen s. Abb. 3.4);  $h_0 = c_2 \cdot A \cdot n$  folgt:

$$Fr_q = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{f}{c_2}\right)}} \quad (3.6)$$

Unter der Annahme laminarer Strömungsverhältnisse wird der Reibungsbeiwert  $f$  durch die Gleichung von Darcy-Weisbach:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (3.7)$$

für offene Gerinne ersetzt. Da es sich hier lediglich um eine Abschätzung des Einflusses der Viskosität auf die Strömungsverhältnisse im Wellenauf- und Wellenüberlauf handelt, ist diese Vorgehensweise zulässig.

---

<sup>3.1.)</sup> *Schulz* (1992) findet größere Wellenaufauflhöhen für Sturzbrecher im großmaßstäblichen Modell (2% für glatten 1:6 Deich und 8% für glatten 1:12 Deich). Für Reflexionsbrecher kann der Einfluß des Maßstabs 10% (glatte Böschung) bis 15% (raue Böschung) für einen 1:6 Deich betragen und bis auf 20% (25%) für eine glatte (raue) 1:12 Böschung zunehmen. Der Unterschied in der Wellenüberlaufmenge kann eine Zehnerpotenz annehmen (*Kajima u. Sakakiyama*, 1994).

Für den Wellenüberlauf sind weniger die Wellenparameter als vielmehr die Strömungsverhältnisse an der Deichkrone von Bedeutung. Daher soll im folgenden eine überlaufbezogene Reynolds-Zahl  $Re_q$  entwickelt werden.

Als kennzeichnende Länge wird die Restauflaufhöhe  $(A - R_C)$  verwendet, wobei  $(A - R_C)$  am höchsten Punkt des Wellenauflaufes Null wird und am RWS ( $R_C = 0$ ) gleich der Wellenaufbauhöhe selber ist. Als Geschwindigkeit wird die verbleibende mittlere Restauflaufgeschwindigkeit  $(A - R_C)/(0,5 \cdot T)$  angesetzt, d.h. die mittlere Geschwindigkeit der Auflaufzunge von der Freibordhöhe bis zum höchsten Punkt des Wellenauflaufes auf einer virtuell verlängerten Deichböschung während einer halben Wellenperiode  $T$ . Damit folgt die überlaufbezogene Reynolds-Zahl  $Re_q$  zu:

$$Re_q = \frac{2 (A - R_C)^2}{\nu T} \quad (3.8)$$

Wird Gl. (3.6) unter Berücksichtigung der Gleichungen (3.7) und (3.8) aufgetragen ( $c_2$  aus Abschnitt 4.3.3.1), so folgt das Ergebnis in Abb. 3.4 für wellenüberlaufbezogene Reynolds-zahlen in den Modellversuchen zwischen  $10^3 < Re_q < 10^5$ .

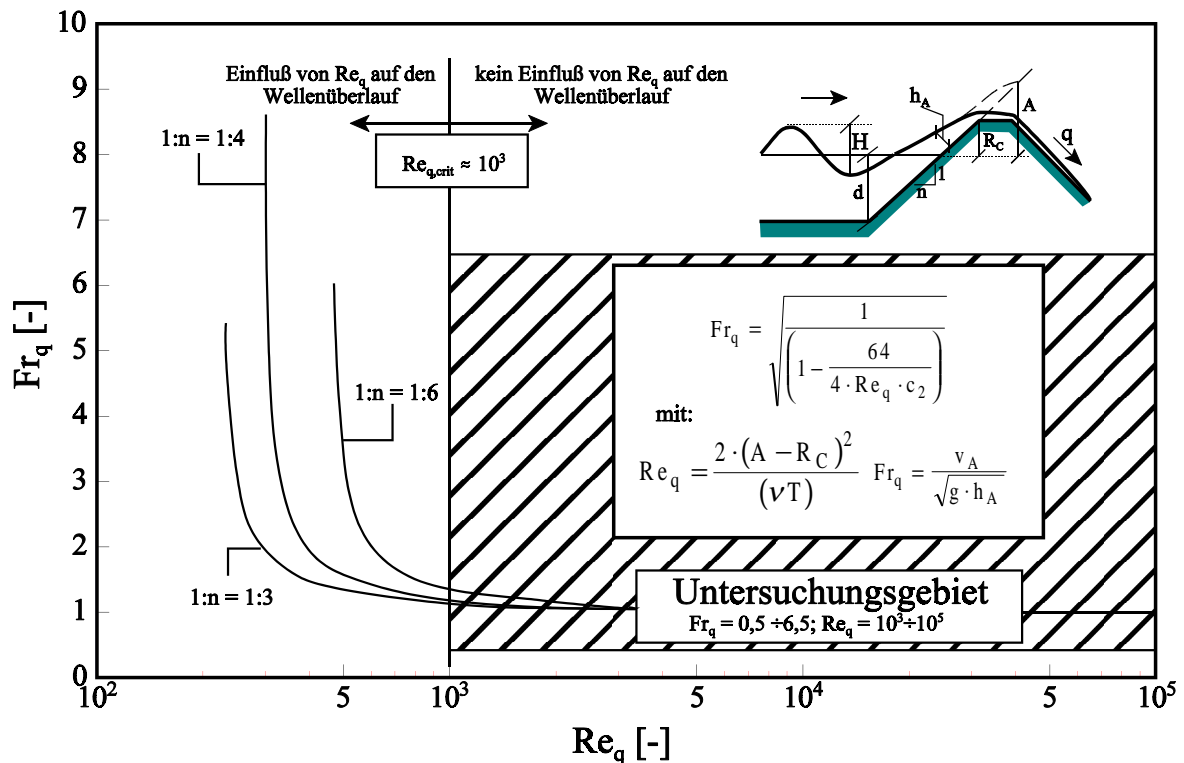


Abb. 3.4: Einfluß der Viskosität auf die Auf- und Überlaufgeschwindigkeiten

In Abb. 3.4 ist festzustellen, daß ein Einfluß der Viskosität auf die Überlaufströmung vorhanden ist, wenn  $Re_q < 10^3$  ist. Dies entspricht einem Wellenüberlauf bei Freibordhöhen nahe der Wellenaufbauhöhe. In diesem Bereich ist der Einfluß des Maßstabs auf den Wellenüberlauf besonders stark. Da die wellenüberlaufbezogene Reynolds-Zahl nur für wenige Versuche unterhalb der kritischen Reynolds-Zahl liegt, kann davon ausgegangen werden, daß die Viskosität von vernachlässigbarem Einfluß auf die Ergebnisse dieser Arbeit ist.

### **3.1.3 Diskussion und kritische Bewertung der Maßstabseffekte für die vorliegenden Untersuchungen**

Der Einfluß der Oberflächenspannung und der Viskosität auf die Wellenausbreitung ist bei den vorliegenden Modellversuchen vernachlässigbar. Es konnte theoretisch gezeigt werden, daß die Modellversuche über den kritischen Grenzwerten liegen (Tab. 3.1).

Der Einfluß der Oberflächenspannung auf den Wellenaufbau und Wellenüberlauf ist ebenfalls von vernachlässigbarer Bedeutung. Eine kritische Weber-Zahl wurde theoretisch zu  $We_{crit}=10$  bestimmt, während die Modellversuche im Bereich  $30 < We < 3000$  liegen. Viskose Effekte treten beim Wellenüberlauf unterhalb von  $Re_{q,crit} = 10^3$  auf. Diese führen zu einer erhöhten Reibung und damit zu geringeren Wellenüberlaufhöhen. Dies ist bei der Interpretation der Meßergebnisse der vorliegenden Arbeit zu berücksichtigen. Damit die Arbeit auch auf Naturverhältnisse übertragbar ist, sind die Modellversuche mit wellenüberlaufbezogenen Reynolds-Zahlen  $Re_q < 10^3$  bei der Auswertung auszuschließen. Da kleine wellenüberlaufbezogene Reynolds-Zahlen insbesondere für sehr kleine Wellenüberlaufmengen auftreten, sind großmaßstäbliche Modellversuche erforderlich, um die vorliegenden Untersuchungen auch für  $Re_q > 10^3$  zu verifizieren.

## **3.2 Anmerkungen zur Übertragbarkeit auf die Naturverhältnisse**

Neben Maßstabseffekten sind im Rahmen experimenteller Untersuchungen auch Modelleffekte zu beachten. Da die typischen Modelleffekte in Wellenkanälen (parasitäre Wellen, Wellengenerierung, Wellenabsorption, Meßtechnik, etc.) bereits umfassend im Schrifttum beschrieben sind (z.B. Müller, 1995; Hughes, 1995), soll hier die Übertragbarkeit von Modelluntersuchungen zum Wellenauf- und Wellenüberlauf auf die Natur betrachtet werden.

Tab. 3.1: Maßstabseffekte bei der Nachbildung des Wellenauflaufes und Wellenüberlaufes

Prozeß	wirkende Kräfte	Modell-gesetz	Kriterien für Vernachlässigung der Maßstabseffekte	Größenordnung im Modell
Wellenausbreitung	Schwerkraft, Reibungskräfte, Oberflächenspannung	$Fr_w, Re_w, We$	$Re_w > Re_{w,crit} = 1 \cdot 10^4$ $T > 0,35s; d > 2,0cm$	$Re_w > 1 \cdot 10^6$ $T > 1,5s; d > 0,60m$
Wellenbrechen	Reibungskräfte, Oberflächenspannung	$Re_w, We$	$Re_w > Re_{w,crit} > 3 \cdot 10^4$ $T > 0,35s; d_b > 2,0cm$	$Re_w > 1 \cdot 10^6$ $T > 1,5s; d_b > 6,0cm$
Wellenauflauf	Schwerkraft, Oberflächenspannung, Reibungskräfte	$Fr_A, Fr_q, We, Re_q$	$We > We_{crit} = 10$ $Re_q > Re_{q,crit} = 10^3$	$30 < We < 3000$ $10^3 < Re_q < 10^5$
Wellenüberlauf	Schwerkraft, Oberflächenspannung, Reibungskräfte	$Fr_A, Fr_q, We, Re_q$	$We > We_{crit} = 10$ $Re_q > Re_{q,crit} = 10^3$	$30 < We < 3000$ $10^3 < Re_q < 10^5$

Mit:  $Fr_w = c/(g \cdot d)^{1/2}$ ;  $Fr_A = v_A/(g \cdot h_A)^{1/2}$ ;  $Fr_q = v_A/(2 \cdot g \cdot A)$ ;  $Re_w = c \cdot d/\nu$ ;  $Re_q = (A - R_c)^2/(\nu \cdot T)$ ;  $We = v_A \cdot h_A \cdot \rho_w/\sigma_w$ ;

Naturuntersuchungen zum Wellenüberlauf an Seedeichen liegen aufgrund der Seltenheit und Unvorhersehbarkeit des Ereignisses bislang nicht vor. Vergleichende Natur- und Modelluntersuchungen zum Wellenauflauf wurden von *Grüne* (1982, 1996), *Niemeyer et al.* (1995, Einmessung von Teekgrenzen) und *De Rouck et al.* (1998 für geschüttete Wellenbrecher) vorgenommen. Die Untersuchungen zeigen um bis zu 50% höhere Wellenauflaufhöhen in der Natur als im Modell. Systematische Vergleichsuntersuchungen liegen bislang nicht vor und werden z.Zt. im Rahmen des MAST-III-OPTICREST Projektes durchgeführt (*Rouck et al.*, 1998; *Schüttrumpf u. Oumeraci*, 1999b). Erste Ergebnisse zeigen inzwischen, daß die Abweichungen zwischen Modell- und Naturdaten im wesentlichen durch die verwendete Meßtechnik und die Berücksichtigung gemessener Wellenspektren deutlich verringert werden können. *Van Gent* (1999) stellt für den Seedeich von Petten (Niederlande) durchschnittliche Abweichungen in der relativen Auflaufhöhe  $A_{98}/H_s$  zwischen Modell- und Naturmessung von 4% fest.

Die Bedeutung höherer Wellenauflaufhöhen in der Natur auf den Wellenüberlauf liegt in der exponentiellen Beziehung zwischen Wellenauflaufhöhe und mittlerer Wellenüberlaufrate (vgl. Tab. 2.4). Dadurch ist auch für den Wellenüberlauf in der Natur mit deutlich höheren Werten als im Modell zu rechnen. *Kajima u. Sakakiyama* (1994) zeigen, daß die mittleren Wellenüberlaufraten in der Natur mehr als das 10-fache der Wellenüberlaufraten im Modell betragen können. *Oumeraci et al.* (2000) führen dies auf die Verwendung von theoretischen Wellenspektren (TMA; PM; JONSWAP) anstelle gemessener Wellenspektren zurück. Naturspektren besitzen häufig einen langperiodischen Wellenanteil, der bei der Wellengenerierung in Wellenkanälen häufig vernachlässigt wird.

Daher sind in Zukunft weitergehende Untersuchungen erforderlich, um insbesondere die Unsicherheiten bei der Berücksichtigung des Naturseegangs (Spektralform und Richtungsstruktur) auf den Wellenaufbau und Wellenüberlauf zu bestimmen. Aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit konnte dieser Aspekt bei dem bereits sehr umfangreichen Untersuchungsprogramm nicht berücksichtigt werden.

### **3.3 Modellaufbau, Meßtechnik, Versuchsprogramm und -methodik**

#### **3.3.1 Modellaufbau**

Die Modellversuche wurden im Wellenkanal (Länge: 100m; Breite: 2,0m; Tiefe: 1,25m) des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Für die Wellengenerierung (*regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren*) wurde eine Wellenmaschine in Klappenbauart verwendet.

Der Modelldeich bestand aus einer Stahlkonstruktion mit aufgesetzten Multiplex-Holzfasertafeln. Die Neigungen der Außenböschung und der Binnenböschung konnten variiert werden (s. Abschnitt 3.3.3 „Versuchsprogramm“). Die Breite der Deichkrone ( $B=0,30\text{m}$ ) wurde konstant gehalten. Zur Durchführung von Referenzversuchen ohne Wellenüberlauf wurde die Deichaußenböschung verlängert. Abb. 3.5 zeigt schematisch den Modellaufbau einschließlich der Meß- und Beobachtungstechnik und Abb. 3.6 einen Blick auf das Modell in Richtung der Wellenmaschine. Längsschnitte durch den Kanal mit den Positionen aller Meßgeräte für die untersuchten Deichprofile sind in Anlage A dargestellt.

#### **3.3.2 Meßtechnik**

Für die Modellversuche (Abb. 3.6) wurden insgesamt 40 Meßgeräte und 2 Videokameras verwendet, um die Wellen, Strömungsgeschwindigkeiten, Schichtdicken und Wellenüberlaufzeiten zeitlich und örtlich zu erfassen. Abb.3.7 gibt einen Überblick der verwendeten Meßgeräte, ihrer Anzahl sowie der gerätespezifischen Meßbereiche. Aufgaben und Ziele der einzelnen Meßgeräte werden im folgenden näher beschrieben:

**Wägeeinrichtung:** Messung der individuellen Wellenüberlaufmengen durch Wägung des Auffangbehältergewichts. Diese Messung ist gleichzeitig eine Vergleichsmessung für die Überlaufermittlung aus Schichtdickenmessung und Geschwindigkeitsmessung (Typisches Meßsignal: Abb.3.11).

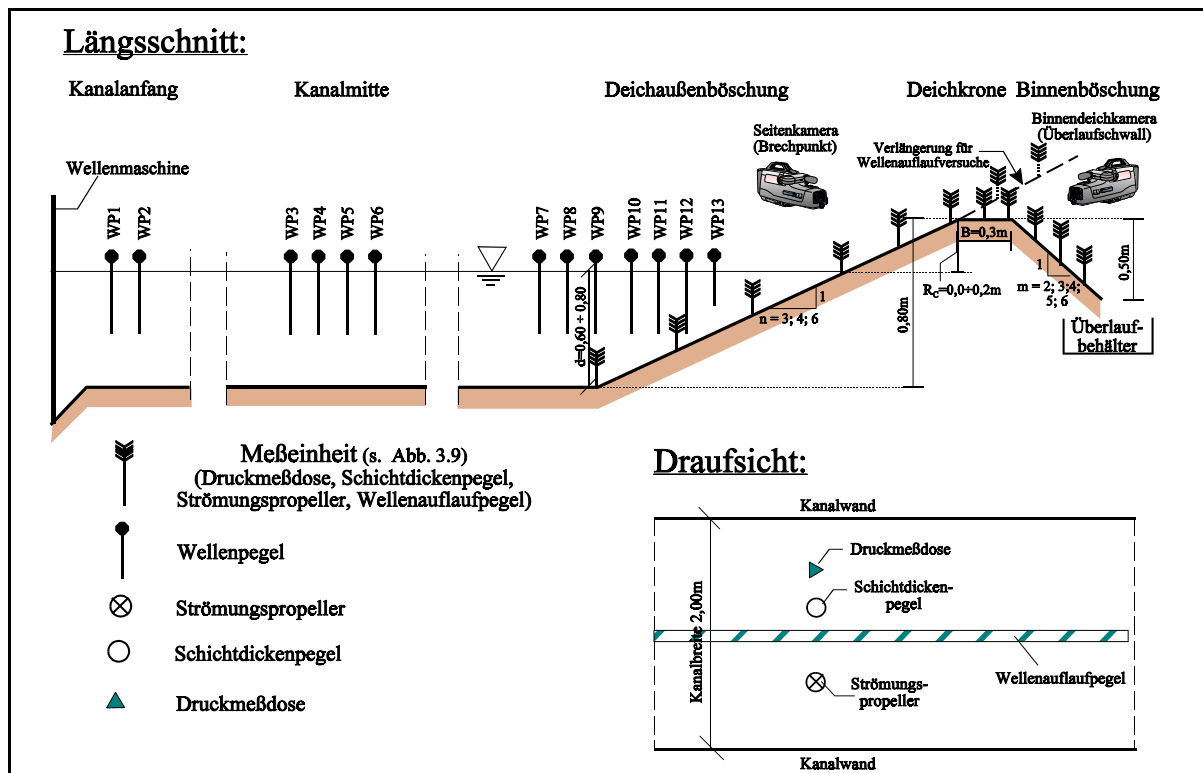


Abb. 3.5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus incl. Meßtechnik (Detaillierte Informationen s. Anlage A)

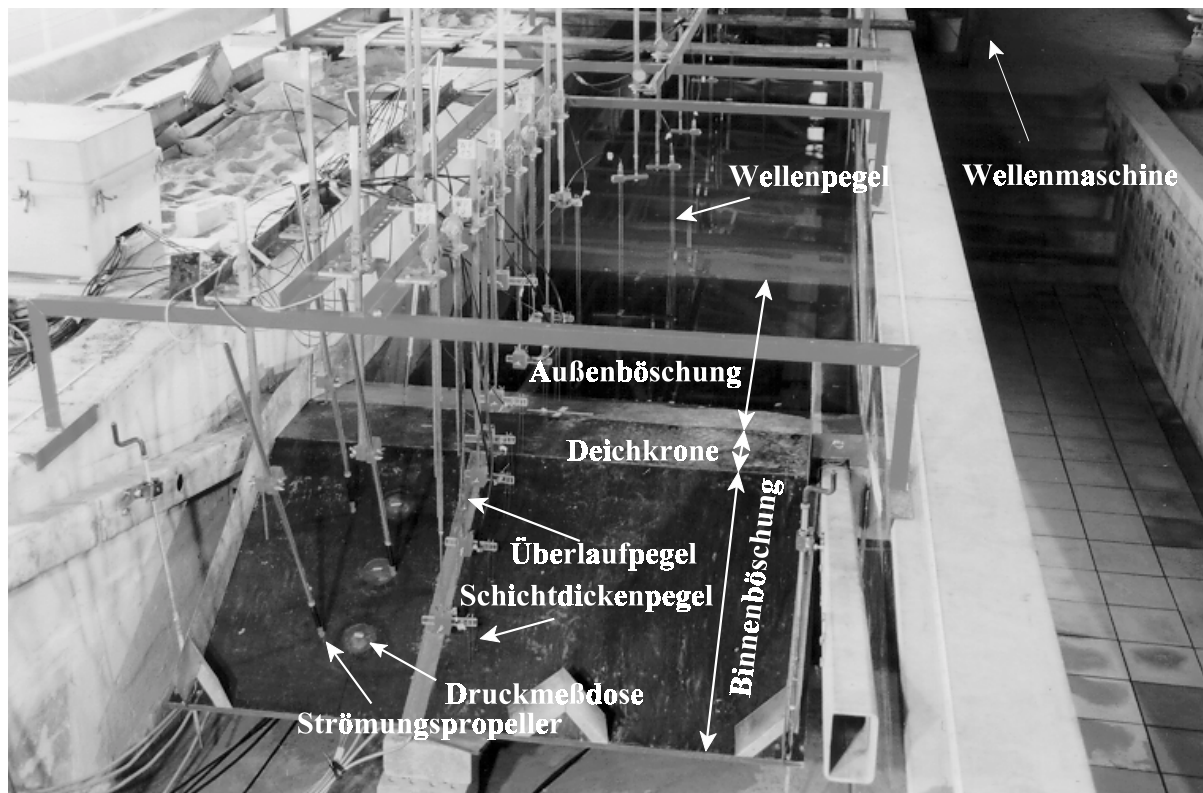


Abb. 3.6: Blick auf die Modelldeichbinnenböschung in Richtung Wellenmaschine

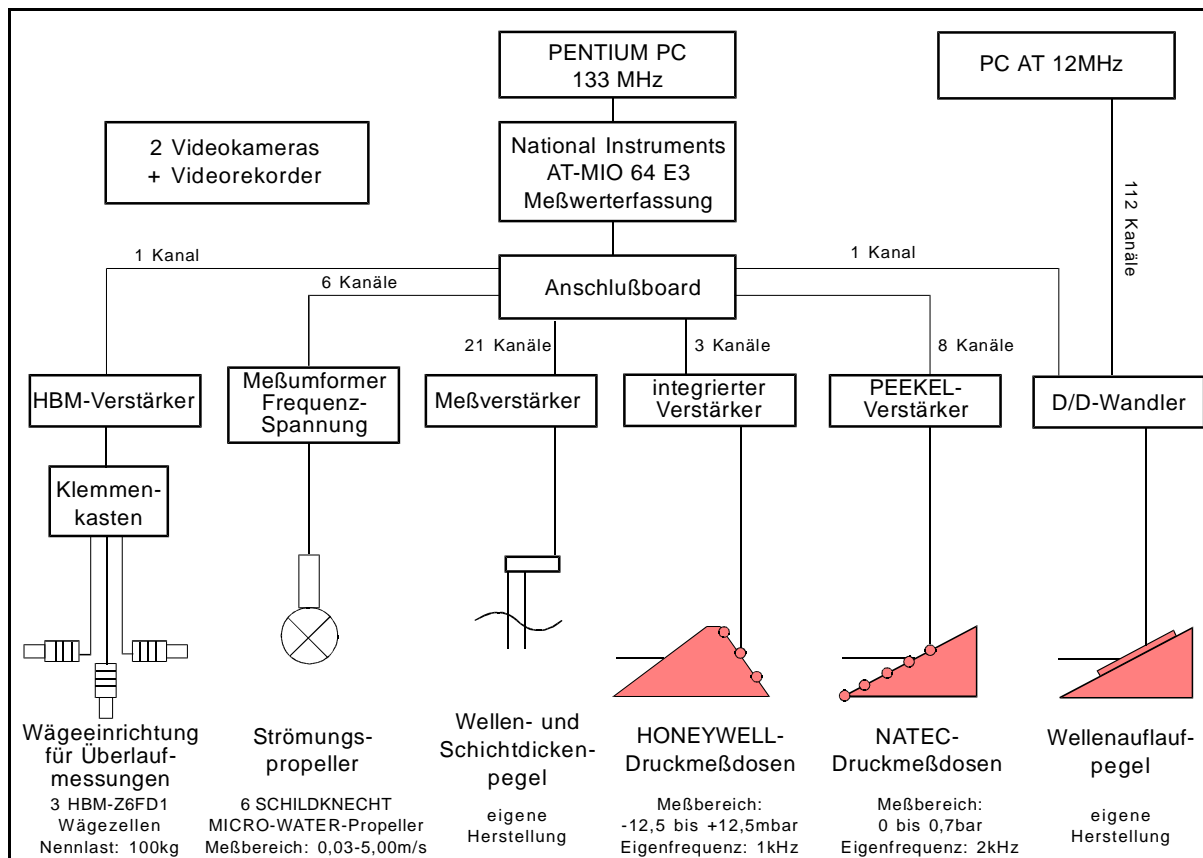


Abb. 3.7: Meßgeräte und Meßwerterfassung

**Wellenpegel:** Erfassung der Wasserspiegelauslenkung zur Ermittlung der ankommenden Welle, des Reflexionskoeffizienten sowie der Wellentransformation auf der Deichaußenböschung (Typisches Meßsignal: Abb. 2.3a und 3.11).

**Schichtdickenpegel** (Abb. 3.8): Ermittlung der zeitlichen Schichtdickenentwicklung auf Deichaußenböschung, -krone und -innenböschung (Typisches Meßsignal: Abb. 3.11).

**Strömungspropeller** (Abb. 3.8): Geschwindigkeitsmessung im Auf- und Überlaufschwall. Die Strömungspropeller haben einen Durchmesser von 8mm und wurden direkt auf die Deichböschung gesetzt (Typisches Meßsignal: Abb. 3.11).

**Wellenauflaufpegel / Überlaufpegel** (Abb. 3.8): Messung der Position der Auflaufzunge bzw. Überlaufzunge. Das Prinzip des verwendeten digitalen Stufenpegels wurde ausführlich von Grüne (1982) und Schulz (1992) beschrieben.

**Videoaufzeichnung:** Dokumentation aller Versuche von zwei Standorten (Seitenansicht, Blick auf Binnenböschung) aus. Grundlage für die Ermittlung der Brechertypen, Höhe und Ort der brechenden Welle sowie des Aufschlagpunktes der brechenden Welle auf der Böschung.



Alle Daten wurden mit einer Meßfrequenz von 40 Hz aufgezeichnet und kanalweise auf einem PC-Pentium 133 MHz abgespeichert. Als Meßwerterfassung wurde eine NATIONAL INSTRUMENTS AT-MIO 64 E3-Karte mit einer Summenabtastrate von 500 kHz verwendet

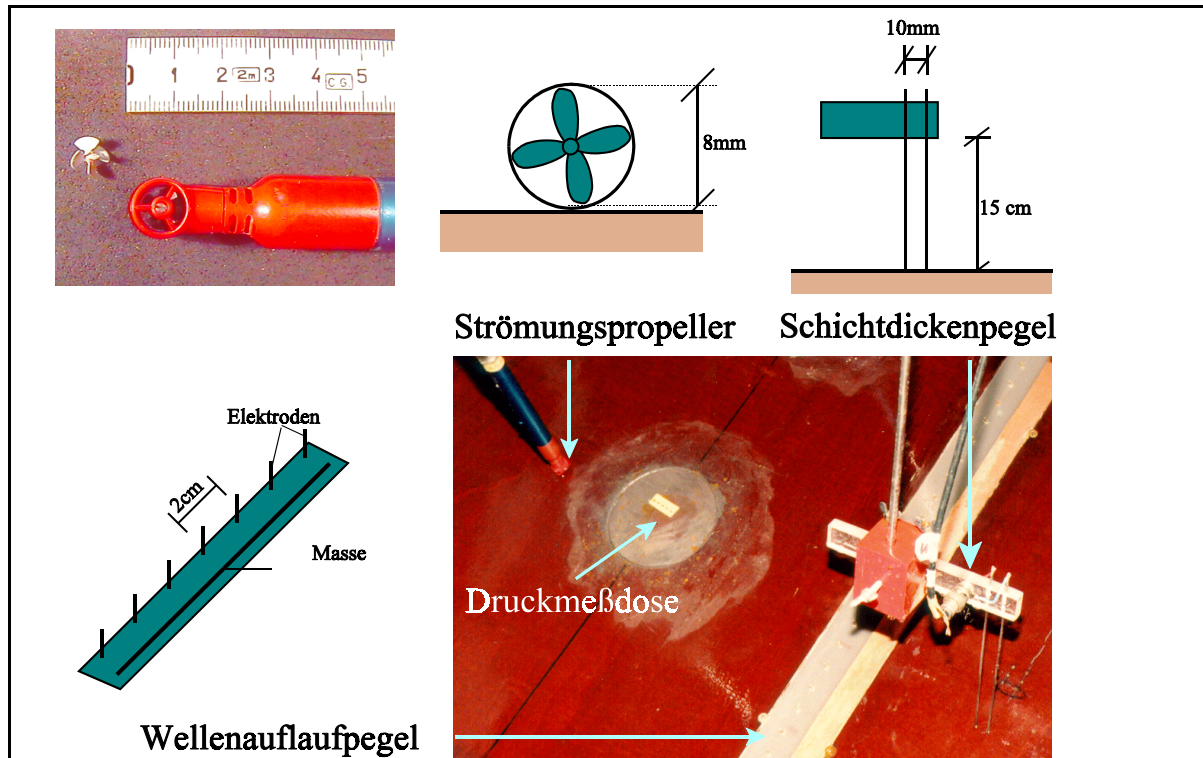


Abb. 3.8: Meßeinheit, bestehend aus Strömungspropeller, Druckmeßdose, Schichtdickenpegel und Wellenauflaufpegel

### 3.3.3 Versuchsprogramm und -methodik

Modellversuche wurden für drei grundlegende Deichvarianten durchgeführt, die sich durch die Neigung der Außenböschung unterscheiden (Tab. 3.2). Für jede Deichvariante wurde zusätzlich die Neigung der Deichbinnenböschung variiert.

Tab. 3.2: Kombinationen der Neigungen von Deichaußenböschung und Deichbinnenböschung

Neigung der Deichaußenböschung	Neigung der Deichbinnenböschung
1:6	1:3; 1:4; 1:5; 1:6
1:4	1:2; 1:3
1:3	1:2; 1:3

Zusätzlich zu den Versuchen **mit** Wellenüberlauf wurden auch Versuche mit einer verlängerten Deichböschung durchgeführt, bei der Wellenüberlauf ausgeschlossen wurde. Diese Versuche

**ohne** Wellenüberlauf wurden für die Präzisierung der physikalischen Randbedingung ( $q=0$ ) durchgeführt.

Für die Modellversuche **mit** Wellenüberlauf wurde die Deichaußenböschung ab einer Höhe von 0,80m ü. Kanalsohle entfernt und durch eine Konstruktion für Deichkrone und Deichbinnenböschung ersetzt. Die Deichbinnenböschung konnte variabel verschiedenen Neigungen angepaßt werden. Die untersuchten Kombinationen sind in Tab. 3.2 dargestellt.

Um die Freibordhöhe  $R_C$  zu variieren, wurde der Wasserstand vor dem Deich geändert ( $d=0,60\text{m}$ ;  $d=0,70\text{m}$ ;  $d=0,75\text{m}$ ;  $d=0,80\text{m}$ ). *Schiff* (1972) und *Waal* (1996) zeigen, daß ab einer relativen Wassertiefe  $d/H > 3,0$  der Einfluß der Wassertiefe auf den Wellenauf- bzw. Wellenüberlauf vernachlässigbar ist. Bei einer max. Wellenhöhe von  $H=0,20\text{m}$  und einem Wasserstand von  $d=0,60\text{m}$  wird dieses Verhältnis bei ungünstigster Kombination gerade erfüllt. Für alle anderen Versuche ist  $d/H > 3,0$ . Somit ist der Einfluß der Wassertiefe im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigbar.

Die Modellversuche wurden sowohl mit *regelmäßigen Wellen* (Trochoidalwellen) als auch mit *Wellenspektren* vom Typ JONSWAP (Phillips-Konstante  $\alpha_p = 0,0081$ ; Peaküberhöhungsfaktor  $\gamma = 3,3$ ; Formparameter zur Beschreibung der vorderen Peakbreite  $\sigma_a = 0,07$ ; Formparameter zur Beschreibung der hinteren Peakbreite  $\sigma_b = 0,09$ ; Groupiness-Faktor  $GF = 0,7$ ) durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug 100s. Diese Versuchsdauer ist ausreichend, da das Ziel der Arbeit eine physikalische Beschreibung des Strömungsfeldes und keine statistische Erfassung von Ereignissen mit kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit ist. Tab. 3.3 gibt eine Übersicht des Versuchsprogramms. Eine vollständige Übersicht aller Versuche ist in Anlage B dargestellt.

**Tab. 3.3:** Versuchsprogramm für *regelmäßige* und *unregelmäßige Wellen* (für *Wellenspektren* gilt:  $H=H_s$  und  $T=T_p$ )

		Wellenhöhe H [m]			
		0,08	0,12	0,16	0,20
Wellenperiode T [s]	1,5	✓	✓	✓	✓
	2,0	✓	✓	✓	✓
	2,5	✓	✓	✓	✓
	3,25	✓	✓	✓	
	4,25	✓	✓		
	6,0	✓			

Es wurden charakteristische Verhältniswerte ( $\tan\alpha$ ;  $\tan\beta$ ;  $R_C/H_S$ ;  $H_S/d$ ;  $H_S/L_0$ ;  $d/L$ ;  $R_C/d$ ) gebildet, die den typischen Verhältniswerten in der Natur für den Bemessungswasserstand entsprechen (Tab. 3.4). Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Variationsbereiche im Modell und in der Natur. Nicht nachgebildet wurde der Einfluß eines hohen Vorlandes bzw. eines hohen Vorstrandes, der sich in geringen Wassertiefen am Deichfuß bemerkbar macht. Die entsprechenden Verhältniswerte ( $R_C/d$  und  $H_S/d$ ) wurden im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des bereits ohne Vorstrand sehr umfangreichen Versuchsprogramms nicht vollständig nachgebildet und erklären die Abweichungen in Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Variationsbereich der wesentlichen relativen Größen im Modell und der entsprechenden Größen in der Natur

Verhältnis	Natur	Modell
$\tan\alpha$	1:3 ÷ 1:8	1:3; 1:4; 1:6
$\tan\beta$	1:3 ÷ 1:5	1:2; 1:3; 1:4; 1:6
$R_C/H_S$	1,0 ÷ 2,5	0,0 ÷ 2,5
$H_S/d$	0,2 ÷ 0,5	0,10 ÷ 0,30
$H_S/L_0$	0,02 ÷ 0,03	0,001 ÷ 0,06
$d/L$	0,10 ÷ 0,18	0,01 ÷ 0,26
$R_C/d$	0,30 ÷ 1,00	0,2 ÷ 0,5
$\xi_d$	0,75 ÷ 1,50	0,66 ÷ 9,43

### 3.4 Datenaufbereitung und -analyse

Die aufgezeichneten Rohdaten wurden kanalweise visuell und rechnergestützt auf Meßfehler untersucht. Fehlerhafte Datensätze wurden für die weitere Analyse eliminiert und nicht weiter berücksichtigt. Anschließend wurden alle Kanäle kalibriert. Hierbei wurden die unterschiedlichen Gerätefunktionen berücksichtigt, die z.T. zu recht aufwendigen Kalibrierungen führen. Für die meisten Meßgeräte (Wellenpegel, Druckmeßdosen, Wellenauflaufpegel, Wägeeinrichtung) ist die Verwendung eines einfachen Kalibrierwertes (lineare Kalibrierung) ausreichend. Schichtdickenpegel zeigen im unteren Meßbereich einen nichtlinearen Verlauf, der über eine polynomische Kalibrierung und Kalibrierschritte von 2mm berücksichtigt wurde. Der Null-Offset wurde für alle Schichtdickenpegel nachträglich verifiziert. Strömungspropeller benötigen im volleingetauchten Zustand ( $h > 8\text{mm} \triangleq$  Propellerdurchmesser) eine lineare Kalibrierung. Im teileingetauchten Zustand ist das Meßsignal M eine Funktion der Eintauchtiefe (Schichtdicke)

h und der Strömungsgeschwindigkeit v:

$$M = f(h, v) \quad (3.9)$$

Diese Eigenschaft wurde anhand zusätzlicher Modellversuche in einer Strömungsrinne bei stationären Fließverhältnissen untersucht (Aschenbrenner, 1999) und bei der Kalibrierung berücksichtigt. Damit folgt die Strömungsgeschwindigkeit v aus dem Meßsignal M über folgende allgemeine Funktion:

$$\frac{v_{(h < 0,8\text{cm})}}{v_{(h \geq 0,8\text{cm})}} = \frac{h}{(-0,25 + 1,21 h)} \quad (3.10)$$

mit: h = Schichtdicke [cm]  
v = Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Diese Vorgehensweise bei der Kalibrierung von Schichtdickenpegeln und Strömungspropellern ist sehr wichtig, da die extrem dünnen Wasserschichten des Wellenüberlaufes auf der Deichkrone und Deichbinnenböschung eine besondere Behandlung der Meßsignale erfordern. Am Ende der Binnenböschung wurde die Schichtdicke  $h_B$  durchschnittlich mit 1,0cm gemessen und die mittlere Wasserüberdeckung  $\bar{h}_B$  lediglich mit 0,25cm. Diese dünnen Schichtdicken einer stark instationären Strömung verdeutlichen, daß geringe Abweichungen im Meßsignal bereits deutliche Abweichungen im Ergebnis zur Folge haben. Daher konnten die Meßdaten nicht mit automatischen Auswerteroutinen behandelt werden, so daß ein Großteil der Meßergebnisse zusätzlich visuell überprüft wurde.

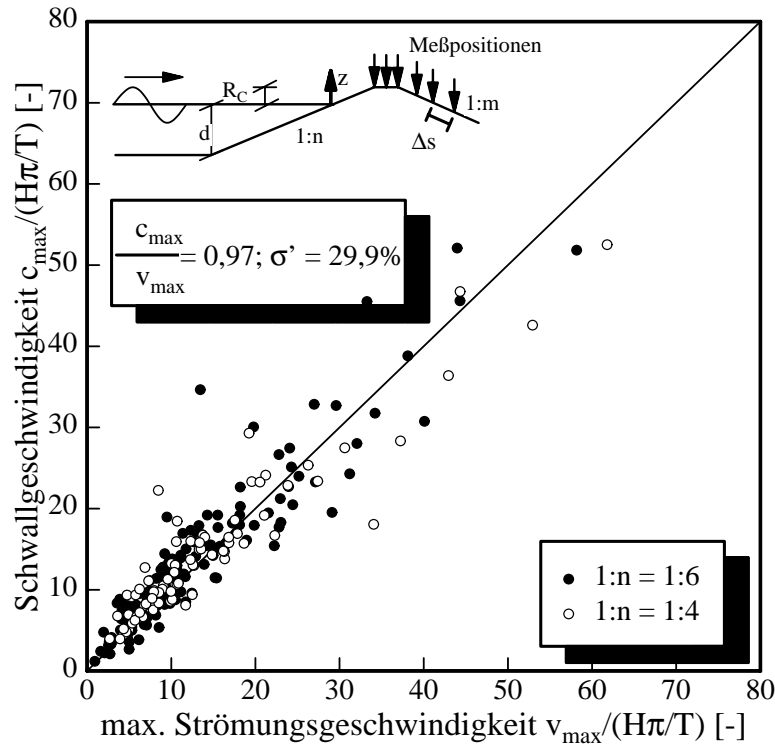
Die Plausibilität der Propellermessungen wurde zusätzlich durch einen Vergleich der maximalen Propellergeschwindigkeiten  $v_{\max}$  mit den Schwallgeschwindigkeiten  $c_{\max}$  verifiziert. Die Schwallgeschwindigkeit  $c_{\max}$  wurde aus der Zeit  $\Delta t$  ermittelt, die die Überlaufzunge für die Distanz  $\Delta s$  zwischen zwei Schichtdickenpegeln benötigt.

$$c_{\max} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.11)$$

Es folgt (Abb. 3.9):

$$\frac{c_{\max}}{v_{\max}} = 0,97 \quad \text{mit:} \quad \sigma' = 29,9\% \quad (3.12)$$

Dies bedeutet, daß der Maximalwert der Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe der Strömungspropeller gut erfaßt werden kann und nicht signifikant durch die Trägheit des Propellers beeinflußt wird. Weiterhin entspricht  $c_{\max}$  der Schwallgeschwindigkeit zwischen zwei Schichtdickenpegeln, womit  $c_{\max}$  leicht unterschätzt wird.



**Abb. 3.9:** Vergleich zwischen maximaler Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\max}$  (Propellermessung) und Schwallgeschwindigkeit  $c_{\max}$  (aus Zeit  $\Delta t$  für Strecke  $\Delta s$  zwischen zwei Schichtdickenpegeln)

Zur Analyse der Schichtdicken und Strömungsgeschwindigkeiten wurden die Programme WAVES und WAVES2D entwickelt. Für jeden Versuch wurden durch re-reflektierte Wellen ungestörte Referenzbereiche  $t_{\text{ref}}^{3.2.)}$  für die Datenanalyse ausgewählt. In diesen Referenzbereichen wurden dann die einzelnen Ereignisse entsprechend Abb. 3.10 definiert. Ein Ereignis kann z.B. der Verlauf der Schichtdicke ( $h(t)=E(t)$ ) bzw. der Strömungsgeschwindigkeit ( $v(t)=E(t)$ ) an einer bestimmten Position  $j$  auf der Deichböschung sein. Für jedes Ereignis  $E_i$  an einer Position  $j$  wurden dann Eintrittszeitpunkt  $t_B(E_i)$ , Zeitpunkt des Ereignismaximums  $t_{\max}(E_i)$ , Endzeitpunkt des Ereignisses  $t_E(E_i)$ , Maximalwert des Ereignisses  $E_{i,\max}$  und zeitlicher Mittelwert  $\bar{E}_i$  festgelegt.

$$\bar{E}_i = \frac{1}{T} \int_{t_B(E_i)}^{t_E(E_i)} E(t) dt \quad (3.13)$$

Alle Ereignisse  $E_i$  eines Referenzbereiches  $t_{\text{ref}}$  werden dann gemittelt

3.2.) Die Zeitdauer der Referenzbereiche  $t_{\text{ref}}$  entsprach für *regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren* dem 20-fachen der Wellenperiode  $T$  bzw. der Peakperiode  $T_p$ .

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{E}_i \quad \text{bzw.} \quad E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{i,\max} \quad (3.14)$$

und die entsprechenden Standardabweichungen  $\sigma(\bar{E})$  bzw.  $\sigma(E)$  werden festgelegt:

$$\sigma(\bar{E}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i - \bar{E})^2}{(n-1)}} \quad \text{bzw.} \quad \sigma(E) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E)^2}{(n-1)}} \quad (3.15)$$

Zusätzlich wird das relative Streuungsmaß  $\sigma'$  (auch Variationskoeffizient genannt) bestimmt:

$$\sigma'_{\bar{E}} = \frac{\sigma(\bar{E})}{\bar{E}} 100 \quad [\%] \quad \text{bzw.} \quad \sigma'_E = \frac{\sigma(E)}{E} 100 \quad [\%] \quad (3.16)$$

Um nun noch die genaue Position auf dem Deich festzulegen, wird ein zusätzlicher Index eingeführt: (A) = Außenböschung, (K) = Deichkrone, (B) = Deichbinnenböschung.

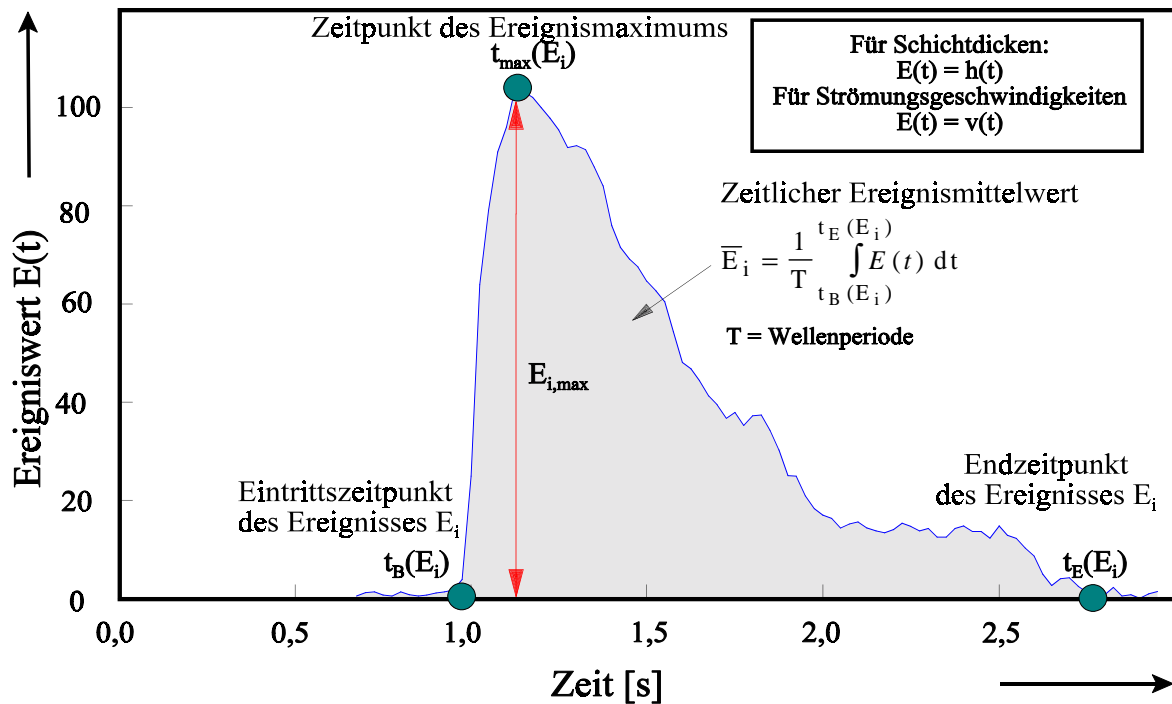


Abb. 3.10: Definition von Überlaufereignissen (z.B. Schichtdicke, Strömungsgeschwindigkeit)

Um insbesondere die Terminologie der einzelnen Strömungsgrößen klar zu definieren, werden in Tab. 3.5 die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Begriffe für Schichtdicken und Geschwindigkeiten zusammengestellt. Dadurch soll deren Verwendung in Verbindung mit Abb. 3.10 und Gl. (3.14) vereinfacht werden.

Tab. 3.5: Definition der verwendeten Strömungsgrößen

Ort	Ereigniswert E bzw. $\bar{E}$	Begriff
Deichaußenböschung	$h_A$	mittlere Schichtdicke
	$\bar{h}_A$	mittlere Wasserüberdeckung
	$v_A$	Auflaufgeschwindigkeit
	$\bar{v}_A$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
Deichkrone	$h_K$	mittlere Schichtdicke
	$\bar{h}_K$	mittlere Wasserüberdeckung
	$v_K$	Überlaufgeschwindigkeit
	$\bar{v}_K$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
Deichbinnenböschung	$h_B$	mittlere Schichtdicke
	$\bar{h}_B$	mittlere Wasserüberdeckung
	$v_B$	Überlaufgeschwindigkeit
	$\bar{v}_B$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit

Weiterhin können Datenreihen verschiedener Meßgeräte (z.B. Strömungspropeller und Schichtdickenpegel) für die Ermittlung resultierender Funktionen miteinander kombiniert werden. Dies wird z.B. für die Ermittlung der zeitlichen Überlauffunktion angewandt.

Abb. 3.11 zeigt beispielhaft, wie aus dem zeitlichen Verlauf der Schichtdicken  $h_K(t)$  und der Strömungsgeschwindigkeiten  $v_K(t)$  am Ende der Deichkrone der Durchfluß  $q(t)$  ermittelt wird. Aus dem Durchfluß  $q(t)$  können dann die mittlere Wellenüberlaufrate  $q$  sowie der Maximaldurchfluß  $q_{\max}$  ermittelt werden. Eine Überprüfung der mittleren Wellenüberlaufraten  $q$  wurde anhand der Wägung des Überlaufbehälters vorgenommen.

Für die Analyse des Wellensignals werden die üblichen Analyseverfahren im Zeit- (Zero-down-Crossing) und Frequenzbereich angewandt. Die Reflexionsanalyse wird nach einer herkömmlichen 3-Pegel-Methode durchgeführt (Mansard u. Funke, 1980).

Spezielle Analysemethoden werden an den entsprechenden Stellen erläutert.

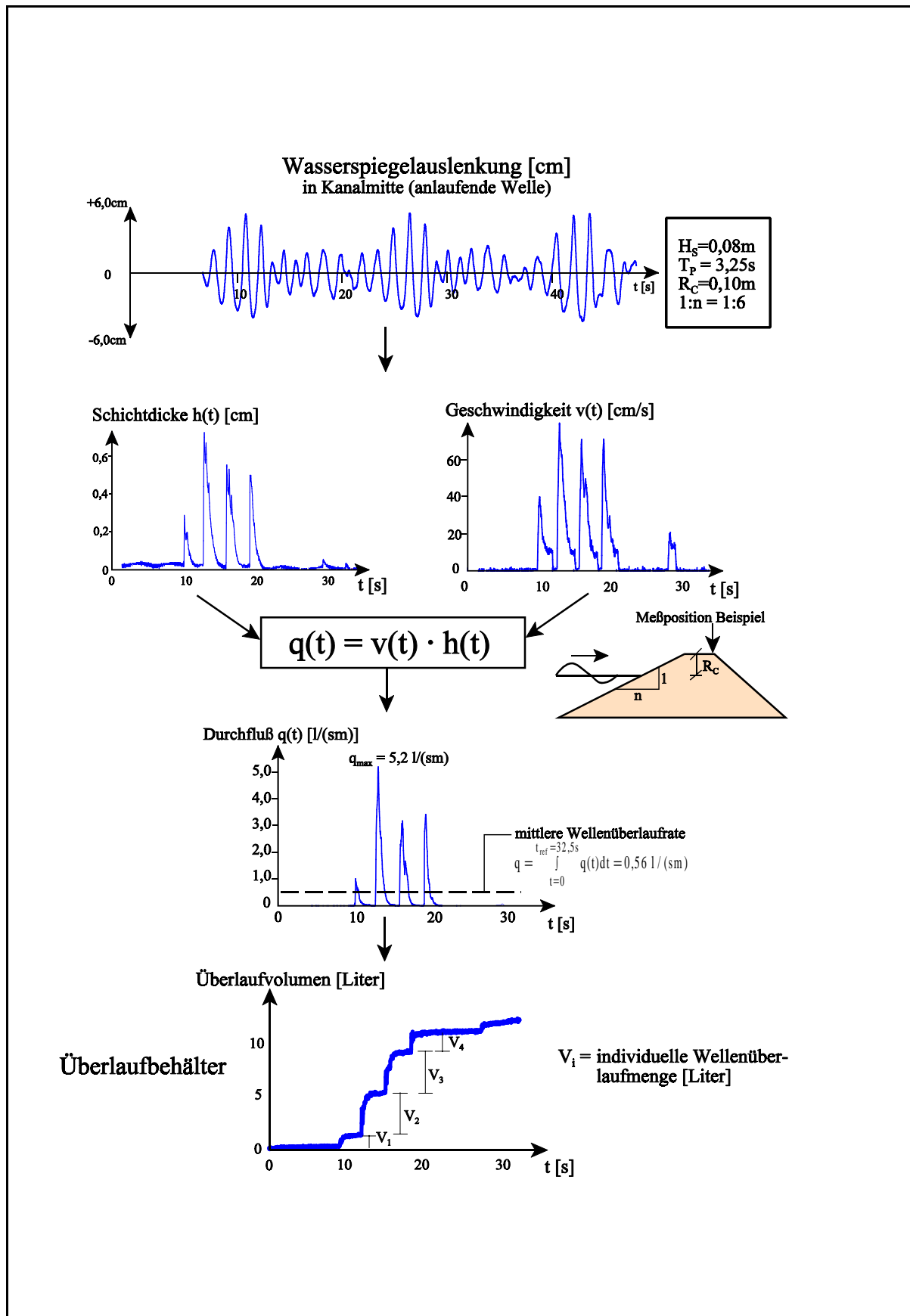


Abb. 3.11: Typische Meßsignale für die verwendeten Meßinstrumente



## 4. Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Bei der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse wird nach der Festlegung der Wellenparameter am Deichfuß (Abschnitt 4.1) zunächst auf das Brechverhalten auf der Deichaußenböschung eingegangen (Abschnitt 4.2). Hierbei wird neben dem Brechvorgang (Brechertyp und Brechpunkt) auch der Auftreffpunkt der brechenden Welle auf der Deichaußenböschung untersucht. Anschließend werden die Prozesse auf der Deichaußenböschung analysiert (Abschnitt 4.3). Nach Bestimmung von Wellenablaufhöhe und Wellenauflaufhöhe als wichtige Randbedingungen für das Strömungsfeld des Wellenüberlaufes wird dann das Strömungsfeld selber untersucht. Dazu werden die Schichtdicken und Geschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung (Abschnitt 4.3), der Deichkrone (Abschnitt 4.4) und der Deichbinnenböschung (Abschnitt 4.5) analysiert. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der verschiedenen Parameter ist in Abb. 4.1 zusammengefaßt. Alle Prozesse werden zuerst theoretisch untersucht, um Berechnungsansätze zu ermitteln. Diese Ansätze werden dann anhand der Modellversuche mit *regelmäßigen Wellen* kalibriert und anhand der Modellversuche mit *Wellenspektren* verifiziert.

Abschließend werden die wesentlichen Ergebnisse anhand eines Anwendungsbeispiels dargestellt (Abschnitt 4.6).

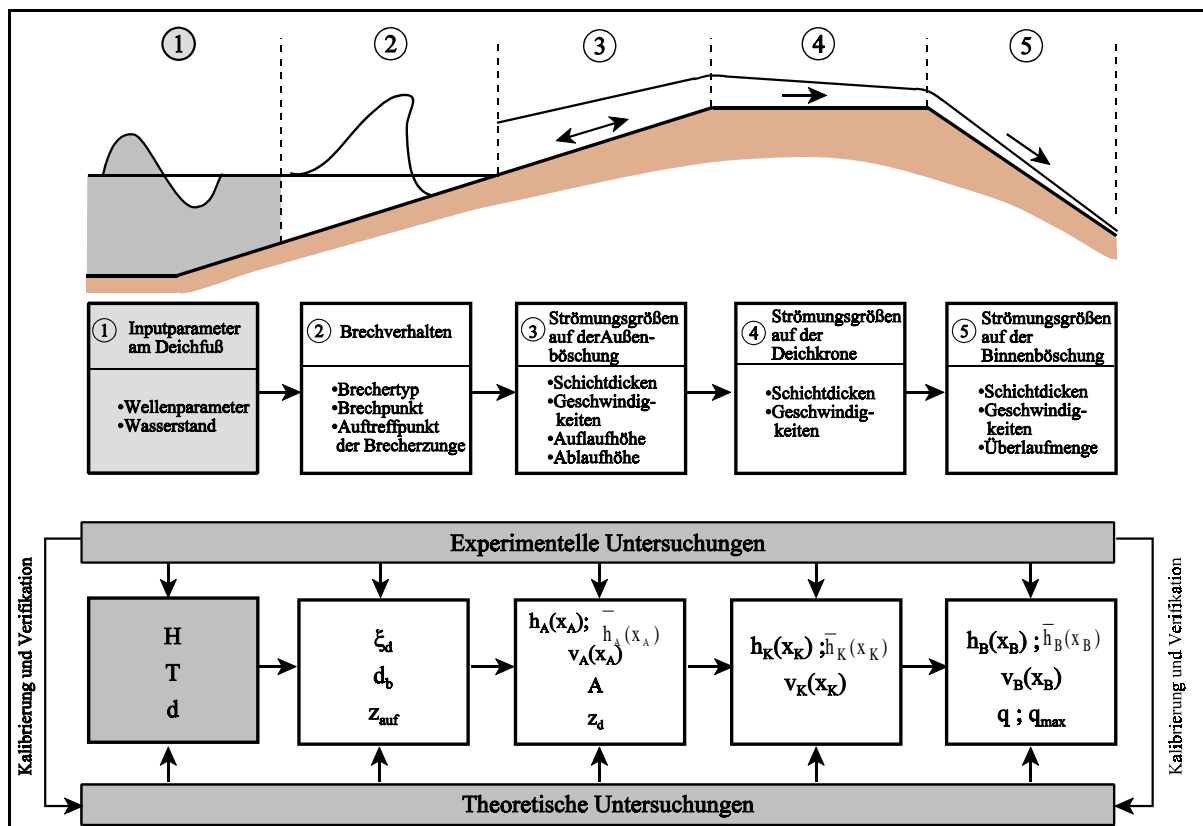


Abb. 4.1: Darstellung der Wellenparameter am Deichfuß im Zusammenhang mit den Prozessen des Wellenüberlaufes

## 4.1 Wellenparameter am Deichfuß

Im folgenden werden kurz die gemessenen Wellenparameter am Deichfuß dargestellt. Anschließend werden Faktoren zur Umrechnung der Wellenparameter vom Zeitbereich in den Frequenzbereich ermittelt.

### 4.1.1 Definition der Wellenparameter am Deichfuß

Die Wellenparameter am Deichfuß stellen die seeseitigen Inputparameter für die Bestimmung des Wellenüberlaufs an einem Deich dar (Abb. 4.1). Die Wellenparameter wurden mit einer 3-Pegel Reflexionsanalyse (*Mansard u. Funke*, 1980) aus dem halbstehenden Wellenfeld am Deichfuß ermittelt. Die Auswertung der Wellenparameter erfolgte sowohl im Zeitbereich (Zero-Down-Crossing Verfahren) als auch im Frequenzbereich (Fourieranalyse). Die folgenden Wellenparameter wurden bestimmt:

- (i) im Zeitbereich: mittlere Wellenperiode  $T_m$   
mittlere Wellenhöhe  $H_m$   
signifikante Wellenhöhe  $H_{1/3}$
- (ii) im Frequenzbereich: Peakperiode  $T_p$   
Wellenperiode  $T_{0,1}$   
Wellenhöhe  $H_{m0}$

Eine genaue Beschreibung dieser Parameter ist z.B. in *IAHR* (1986) oder bei *Oumeraci* (2001) gegeben.

### 4.1.2 Darstellung der Wellenparameter am Deichfuß

Die ausgewerteten Wellenparameter im Zeit- und Frequenzbereich sind in Abb. 4.2 dargestellt. Zusätzlich wurden Umrechnungsfaktoren zwischen den Wellenparametern im Zeit- und Frequenzbereich bestimmt. Ziel dieser Umrechnungsfaktoren ist es, die Ansätze für den Wellenüberlauf, die für die Zeitbereichsparameter  $T_m$  und  $H_{1/3}$  bestimmt wurden, auch bei Vorgabe anderer Wellenparameter (z.B.  $H_{m0}$ ,  $T_p$ ) nutzen zu können. Außerdem konnten allgemeine Zusammenhänge aus dem Schrifttum zwischen den einzelnen Wellenparametern überprüft werden, die in (Tab. 4.1) zusammengefaßt sind. Die ermittelten Verhältniswerte dieser Arbeit zeigen eine gute Übereinstimmung mit Anhaltswerten aus dem Schrifttum. Bei den Versuchen wurden Wellenspektren mit einer geringen Bandbreite der Wellenhöhen eingesteuert. Daher liegt der Verhältniswert  $H_m/H_{1/3}=0,69$  über dem entsprechenden Wert der Rayleigh-Verteilung ( $H_m/H_{1/3}=0,63$ ).

Tab. 4.1: Vergleich der Verhältniswerte von gemessenen Wellenparametern mit Angaben aus dem Schrifttum

Verhältnis	Modellversuche	Schrifttum	Autor
$H_{m0}/H_{1/3}$	1,06	1,05	Schade (1991)
$H_m/H_{1/3}$	0,69	0,61÷0,69	Niemeyer et al. (1995)
$T_{0,1}/T_p$	0,88	0,80÷0,90	Van der Meer (1995)
$T_m/T_p$	0,88	0,80÷0,90	Van der Meer (1995)

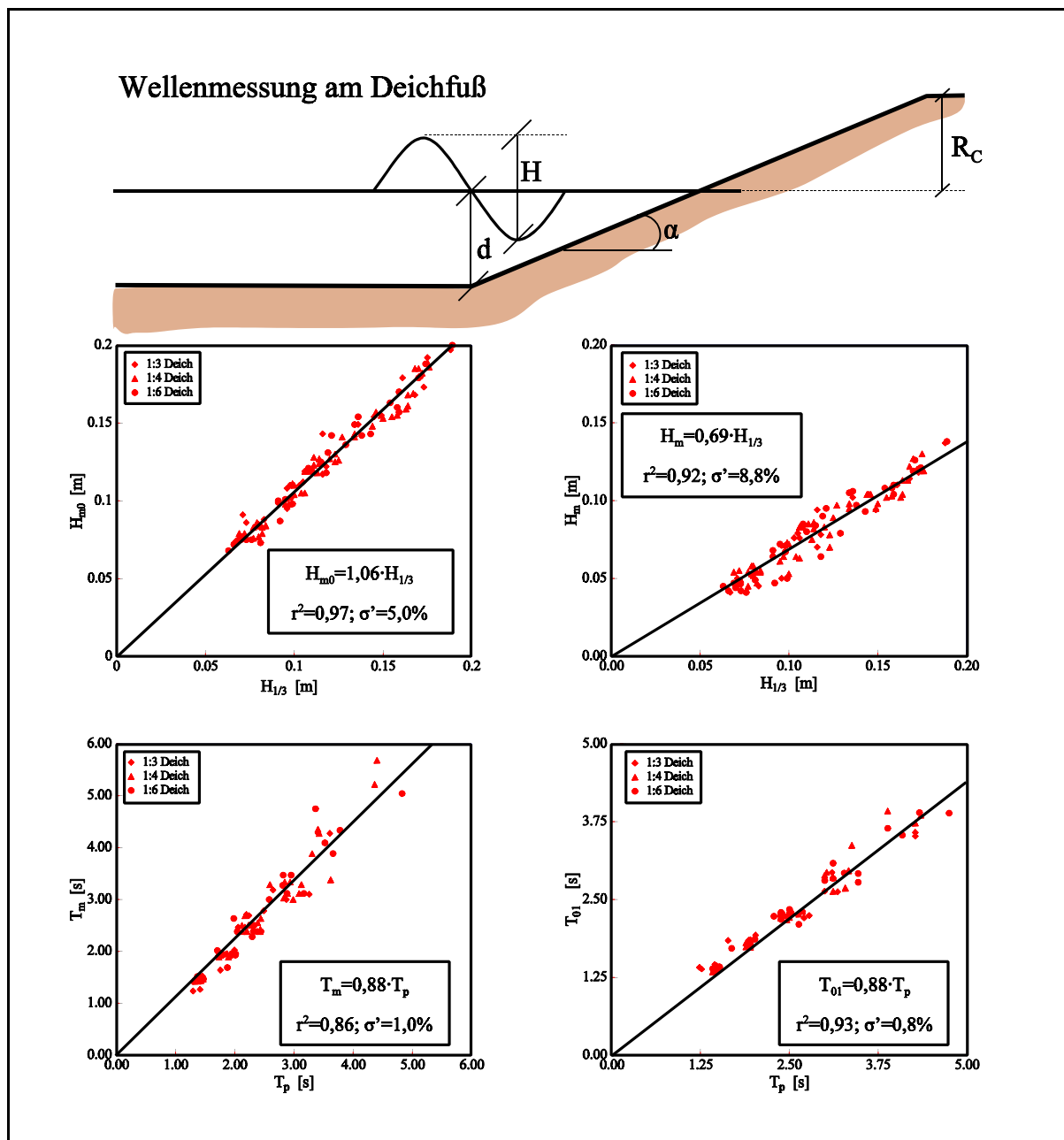


Abb. 4.2: Darstellung der Wellenparameter am Deichfuß

Für die *regelmäßigen Wellen* wurden ebenfalls die Wellenhöhe und Wellenperiode am Deichfuß bestimmt. Eine statistische Auswertung wie bei den *Wellenspektren* entfällt bei den *regelmäßigen Wellen*. *Regelmäßige Wellen* werden im Rahmen dieser Arbeit für eine klarere Darstellung und Absicherung der physikalischen Zusammenhänge sowie eine Kalibrierung der mathematischen Funktionen verwendet. Die abschließenden Berechnungsansätze für die praktische Anwendung werden ausschließlich aus der Analyse der Experimente mit *Wellenspektren* entwickelt.

#### 4.1.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Versuche dieser Arbeit wurden vollständig mit JONSWAP-Spektren durchgeführt. Die **Wellenparameter am Deichfuß** wurden mittels Reflexionsanalyse ermittelt und Verhältniswerte (z.B.  $H_{1/3}/H_{m0}$  oder  $T_m/T_p$ ) berechnet und mit Angaben aus dem Schrifttum verglichen und bestätigt. *Oumeraci et al.* (2000a,b) geben auch für TMA-Spektren und naturnahe Wellenspektren Umrechnungsfaktoren an und zeigen, daß die Verwendung der Peakperiode  $T_p$  in Wattgebieten und auf Vorländern aufgrund der komplexen Form des Wellenspektrums nicht geeignet ist. Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine Grundsatzuntersuchung zu den Prozessen des Wellenüberlaufs handelt, ist die Verwendung eines theoretischen Wellenspektrums ausreichend. Weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkung des naturnahen Seegangs auf die Wellenparameter am Deichfuß und damit auf den Wellenüberlauf sind jedoch erforderlich.

### 4.2 Brechverhalten

Im folgenden sollen die Parameter bestimmt werden, die für die Beschreibung des Wellenbrechens relevant sind. Hierzu gehören (i) die Beschreibung des Brechverhaltens, (ii) die Festlegung des Brechpunktes und (iii) die Ermittlung des Auftreffpunktes der brechenden Welle auf die Deichaußenböschung (Abb. 4.3). Diese Größen stellen die wesentlichen Eingangsparameter für die Beschreibung der Auflaufbewegung dar.

#### 4.2.1 Brechertypen

Wie bereits in Abschnitt 2.2 gezeigt wurde, sind die physikalischen Prozesse beim Wellenbrechen, Wellenauflauf und Wellenüberlauf vom Brechertyp abhängig. Ein geeignetes Kriterium zur Beschreibung des Brechertyps ist die Brecherkennzahl  $\xi$ , die allgemein wie folgt definiert ist:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H / L}} \quad (4.1)$$

Die Abb. 4.3 und 4.4 zeigen den Brechertyp für die untersuchten Deichneigungen als Funktion der Brecherkennzahl  $\xi_d$  für *regelmäßige Wellen* (Abb. 4.3) und *Wellenspektren* (Abb. 4.4). Da ein Wellenspektrum Wellen enthält, die zu verschiedenen Brechertypen führen, wurde für *Wellenspektren* der vorherrschende Brechertyp bestimmt und in Abb. 4.4 dargestellt. Als Wellenparameter für die Berechnung der Brecherkennzahl  $\xi_d$  für *Wellenspektren* werden die signifikante Wellenhöhe  $H_s$  am Deichfuß sowie die mittlere Wellenperiode  $T_m$  verwendet. Damit gelten für die ganze Arbeit folgende Definitionen für die Brecherkennzahl  $\xi_d$ :

*Wellenspektren:* 
$$\xi_d = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L_0}} \quad \text{mit: } L_0 = \frac{g T_m^2}{2 \pi}$$

*regelmäßige Wellen:* 
$$\xi_d = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad \text{mit: } L_0 = \frac{g T^2}{2 \pi}$$

Schwallbrecher traten bei keiner der untersuchten Deichböschungen auf. Ein erkennbarer Einfluß des Wellenüberlaufs auf den Brechertyp wurde nicht festgestellt.

Die Grenzen in Tab. 4.2 werden für die weitere Arbeit für *regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren* verwendet.

Tab. 4.2: Grenzen für Brechertypen (*regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren*)

Deichneigung 1:n =	Sturzbrecher	Collapsing-Brecher	Reflexionsbrecher
1:6	$\xi_d < 2,1$	$2,1 < \xi_d < 2,8$	$\xi_d > 2,8$
1:4	$\xi_d < 2,4$	$2,4 < \xi_d < 3,1$	$\xi_d > 3,1$
1:3	$\xi_d < 2,6$	$2,6 < \xi_d < 3,3$	$\xi_d > 3,3$
gemittelt	$\xi_d < 2,3$	$2,3 < \xi_d < 3,0$	$\xi_d > 3,0$

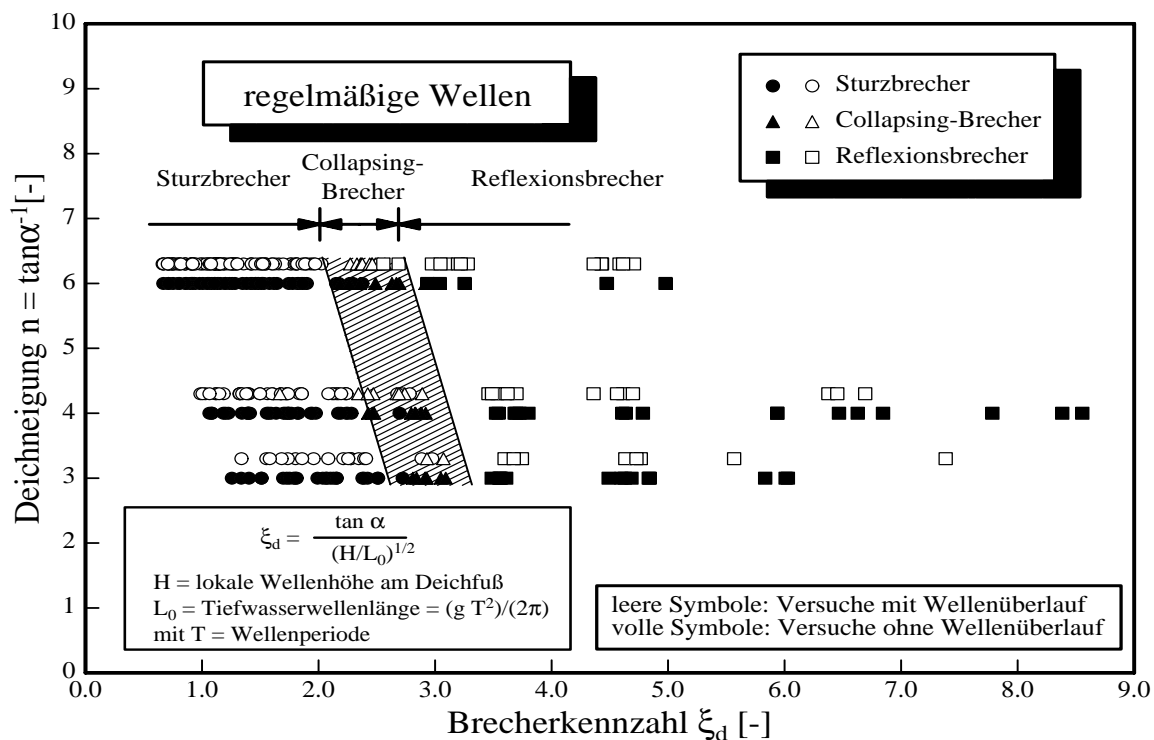


Abb. 4.3: Brechertyp als Funktion der Deichneigung  $n$  und der Brecherkennzahl  $\xi_d$  am Deichfuß für *regelmäßige Wellen*

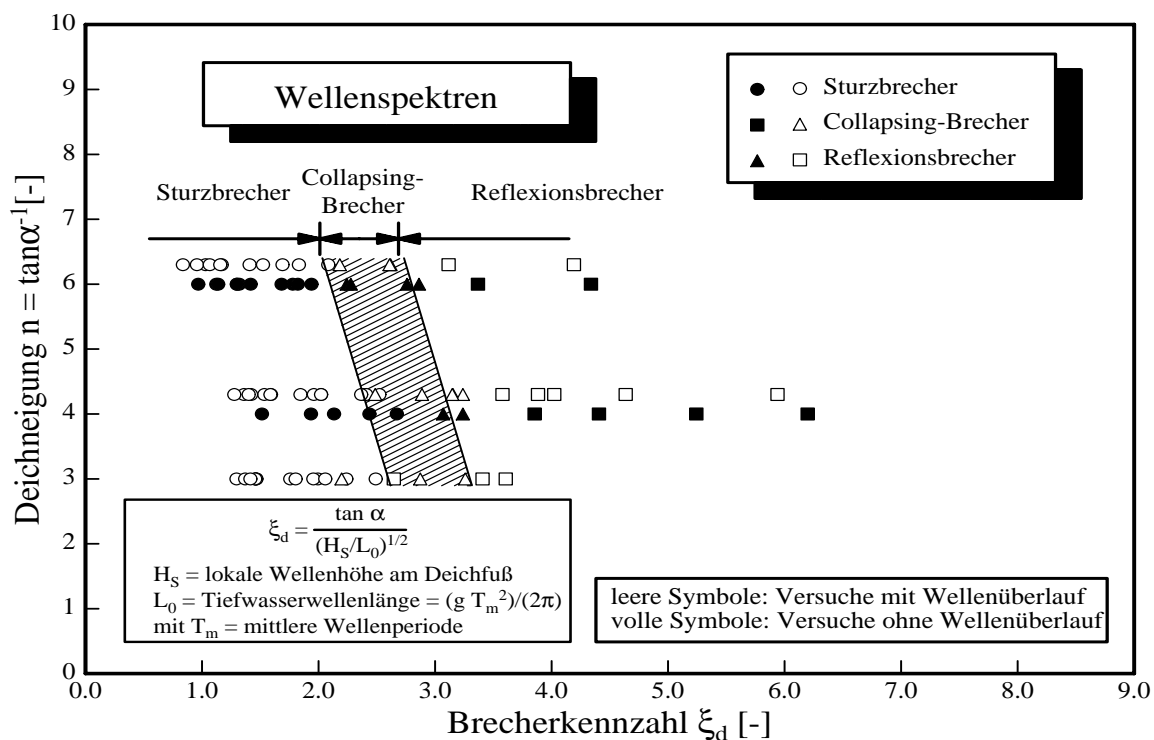


Abb. 4.4: Brechertyp als Funktion der Deichneigung  $n$  und der Brecherkennzahl  $\xi_d$  am Deichfuß für *Wellenspektren*

Die Grenzen zwischen den einzelnen Brechertypen sind fließend und die Typisierung ist insbesondere in den Übergangsbereichen schwierig. Vom physikalischen Verhalten her ist der Collapsing-Brecher eher dem Sturzbrecher zuzuordnen. Daher werden beide im Rahmen der weiteren Arbeit zu einem Brechertyp zusammengefaßt, der weiterhin als Sturzbrecher bezeichnet wird. Als Grenze zwischen Sturz- und Reflexionsbrecher ist die Grenzbrecherkennzahl  $\xi_{gr} = 3,0$  (Tab. 4.2) definiert. Auch *Muttray* (2000) kommt zu einem ähnlichen Ergebnis, klassifiziert aber die Brechertypen nicht nach der Böschungsneigung.

Aus den Abb. 4.3 und 4.4 sowie Tab. 4.2 ist ersichtlich, daß die Grenzen zwischen den verschiedenen Brechertypen eine Funktion der Böschungsneigung  $n$  darstellen. So tritt der Übergang vom Sturz- zum Collapsing-Brecher bzw. vom Collapsing- zum Reflexionsbrecher für den 1:6 Deich bei kleineren Brecherkennzahlen  $\xi_d$  als beim 1:4 bzw. beim 1:3 geneigten Deich auf. Die Brecherkennzahl  $\xi_d$  setzt eine Proportionalität zwischen der Deichneigung  $1:n = \tan \alpha$  und der Wurzel der Wellensteilheit  $(H/L_0)^{-1/2}$  voraus. Der Einfluß der Sohlreibung auf die Wellenumformung wirkt bei der langen 1:6 Böschung jedoch auf einer größeren Länge als bei der kurzen 1:4 bzw. 1:3 Böschung. Daher bricht die Welle relativ gesehen früher auf einer flachen Böschung als auf einer steilen Böschung und die Übergänge zwischen den Brechertypen treten bei kleineren Brecherkennzahlen  $\xi_d$  auf.

#### 4.2.2 Brechpunkt

Neben der Klassifizierung der Brechertypen ist auch die Lage des Brechpunktes für den Wellenauflauf und Wellenüberlauf von Bedeutung. Dieser wird im Folgenden untersucht.

Erste Untersuchungen zur Lage des Brechpunktes wurden von *McCowan* (1894) für das Brechen einer solitären Welle im Flachwasser durchgeführt. *McCowan* ermittelt die relative Brechwassertiefe zu  $(d_b/H) = 1,28$ . *Battjes* (1974) untersuchte experimentell die relative Brechwassertiefe  $(d_b/H)_{max}$  für Schwall- und Sturzbrecher mit Brecherkennzahlen zwischen  $0,1 < \xi_d < 1,0$  und stellte dabei eine Abnahme der relativen Brechwassertiefe  $(d_b/H)_{max}$  von  $(d_b/H)_{max} \approx 1,25$  bis auf  $(d_b/H)_{max} \approx 0,83$  fest (s. Abb. 4.5). *Battjes* ging für Brecherkennzahlen  $\xi_d > 1,0$  von einem festen Verhältnis von  $(d_b/H)_{max} \approx 0,83$  für Sturz- und Collapsing-Brecher aus, was sich im Rahmen dieser Untersuchungen als nicht zutreffend herausstellte. Es erscheint logisch, daß das Brechverhalten auch die Brechwassertiefe  $d_b$  beeinflusst (Abb. 4.5). Hier bestätigt sich, daß bisherige Untersuchungen überwiegend an sehr flachen Strandböschungen (flacher  $1:n = 1:10$ ) durchgeführt wurden und damit die Beschreibung der Brechwassertiefe im Bereich von Brecherkennzahlen  $\xi_d > 1,0$  auf Grundlage bestehender Ansätze nicht möglich ist. Daher wurde die folgende empirische Funktion entwickelt, die insbesondere die Änderung des Brechverhaltens mit der Brecherkennzahl berücksichtigt, aber auch an die Untersuchungen von *Battjes* für kleine Brecherkennzahlen als Grenzbedingung anschließt:

Wellenspektren ( $\sigma'=11\%$ ;  $r^2=0,88$ ):

$$d_b/H_s = 0,95 + 0,45 \tanh(\xi_d - 2,1) \quad (4.2)$$

für:  $0,6 < \xi_d < 6,0$

Regelmäßige Wellen ( $\sigma'=14\%$ ;  $r^2=0,70$ ):

$$d_b/H = 1,1 + 0,35 \tanh(\xi_d - 2,1) \quad (4.3)$$

für:  $0,6 < \xi_d < 6,0$

Die Gl. (4.2) und (4.3) sind in Abb. 4.5 dargestellt.

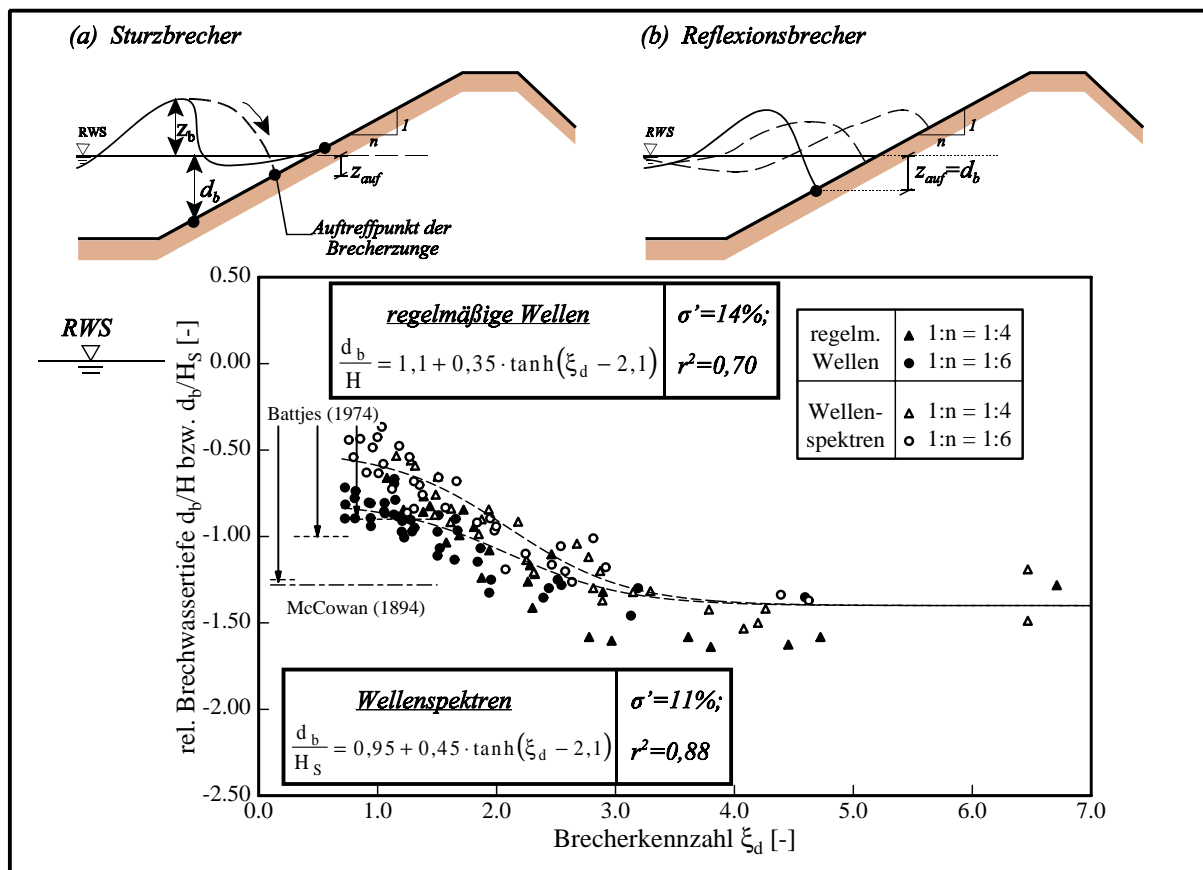


Abb. 4.5: Ermittlung der relativen Brechwassertiefe für *regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren*



### 4.2.3 Auftreffpunkt der brechenden Welle auf die Deichaußenböschung

Der Auftreffpunkt der Brecherzunge ( $z_{\text{auf}}$ ) stellt den Ort auf dem Deich dar, an dem

- die Wellenauflaufbewegung beginnt, und somit die maximalen Auflaufgeschwindigkeiten  $v_{A,\text{max}}$  auftreten. Ab dem Auftreffpunkt findet eine ständige Energieabnahme durch Reibung bis zur Wellenauflaufhöhe  $A$  statt. Daher müssen die max. Auflaufgeschwindigkeiten am Auftreffpunkt auftreten.
- die maximale Druckbelastung der Deichaußenböschung zu erwarten ist, wodurch Kolke mit horizontaler Abrasionsfläche und vertikaler Kliffkante auf Außenböschungen entstehen können.

Die Ermittlung des Auftreffpunktes der Brecherzunge auf die Deichböschung stellt im Rahmen dieser Arbeit den Anfangspunkt der auflaufenden Welle auf der Deichaußenböschung dar. Aufgrund der hohen Turbulenzen an diesem Punkt konnten Strömungsmessungen mit den verfügbaren Meßgeräten nicht durchgeführt werden, so daß sich hier auf die visuelle Festlegung von  $z_{\text{auf}}$  beschränkt wird. Dazu wurden die Videoaufzeichnungen systematisch Welle für Welle am Bildschirm ausgewertet, um die Höhenlage des Auftreffpunktes auf der Deichaußenböschung zu bestimmen (Abb. 4.6).

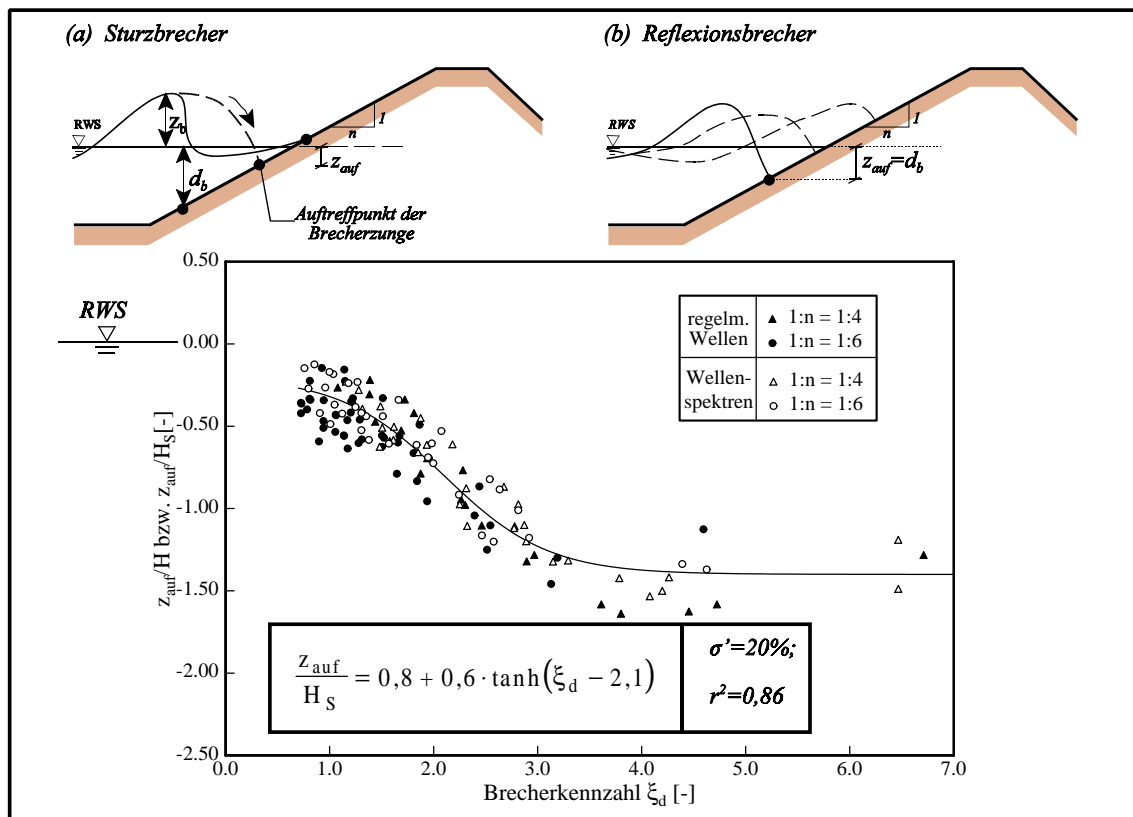


Abb. 4.6: Darstellung des relativen Auftreffpunktes  $z_{\text{auf}}/H$  der brechenden Welle auf die Deichböschung als Funktion der Brecherkennzahl  $\xi_d$  am Deichfuß für Wellenspektren und regelmäßige Wellen

Der Auftreffpunkt ( $z_{\text{auf}}$ ) der Brecherzunge auf die Böschung entspricht für Reflexionsbrecher dem Brechpunkt. Diese Annahme erscheint sinnvoll, da sich der Auftreffpunkt  $z_{\text{auf}}$  für zunehmende  $\xi_d$ -Werte der Brechwassertiefe  $d_b$  nähert. Für Sturzbrecher dagegen ist die Lage des Auftreffpunktes eine Funktion der Brecherkennzahl  $\xi_d$ . Für *Wellenspektren* und *regelmäßige Wellen* kann der Auftreffpunkt der brechenden Welle auf die Deichaußenböschung durch die folgende empirische Funktion beschrieben werden ( $\sigma' = 20\%$ ;  $r^2 = 0,86$ ) (Abb. 4.6):

$$\frac{z_{\text{auf}}}{H_s} = 0,8 + 0,6 \cdot \tanh(\xi_d - 2,1) \quad (4.4),$$

die für Brecherkennzahlen  $\xi_d > 3,0$  (Reflexionsbrecher) den Gl. (4.2) für den Brechpunkt bzw. Gl. (4.7) für den tiefsten Punkt des Wellenablaufes entspricht. Gl. (4.4) kann sowohl für *regelmäßige Wellen* als auch für *Wellenspektren* verwendet werden. Abweichungen in den Ergebnissen zwischen den beiden Wellentypen sind minimal.

#### 4.2.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Prozesse am Brechpunkt bestimmen wesentlich das Wellenauflaufverhalten und damit die Prozesse des Wellenüberlaufes. Daher wurden die drei maßgebenden Parameter für die Beschreibung des Brechverhaltens bestimmt:

- der Brechertyp
- der Brechpunkt
- der Auftreffpunkt der brechenden Welle auf die Deichaußenböschung

Es konnte gezeigt werden, daß der **Brechertyp** für steile Deichböschungen ( $3 \leq n \leq 6$ ) von der Deichneigung  $n$  abhängt. Diese Aussage steht im Widerspruch zu früheren Untersuchungen, die aber nur an sehr flachen Strandböschungen ( $n \geq 10$ ) durchgeführt wurden. Für praktische Zwecke wird allerdings empfohlen, weiterhin mit festen Übergängen vom Sturz- zum Collapsing-Brecher ( $\xi_{gr} = 2,3$ ) bzw. vom Collapsing-Brecher zum Reflexionsbrecher ( $\xi_{gr} = 3,0$ ) zu rechnen. Weitere Untersuchungen an noch steileren Böschungsneigungen ( $n \leq 2$ ) sind erforderlich, um die Abhängigkeit des Brechertyps von der Deichneigung weitergehend zu bestätigen.

Mit Hilfe umfangreicher Videoauswertungen ist es gelungen, den **Brechpunkt**  $d_b$  von *Wellenspektren* auf steilen Böschungen zu beschreiben. Die Höhenlage des Brechpunktes  $d_b$  wurde als Funktion des Brechertyps bestimmt. Es wurde gezeigt, daß die Lage des Brechpunktes für Sturzbrecher von der Brecherkennzahl  $\xi_d$  abhängt und für Reflexionsbrecher einen konstanten Wert annimmt ( $d_b/H_s = 1,4$ ) ( $\sigma' = 14\%$ ).

$$\frac{d_B}{H_S} = 0,95 + 0,45 \tanh(\xi_d - 2,1)$$

für:  $0,6 \leq \xi_d \leq 6,0$

Weitergehende Untersuchungen werden insbesondere hinsichtlich der Bestimmung der Brecherzone an steilen Deichböschungen aber auch des Brechpunktes für Schwallbrecher an flachen Böschungen empfohlen, um die Allgemeingültigkeit der empirischen Gleichung zu erweitern.

Die gebrochene Welle schlägt am **Auftreffpunkt** auf die Deichaußenböschung auf. Ab diesem Punkt beginnt die eigentliche Auflaufbewegung. Auch für den Auftreffpunkt wurde erstmals eine Gleichung entwickelt. Es kann gezeigt werden, daß der Auftreffpunkt für Reflexionsbrecher dem Brechpunkt der Welle entspricht und für Sturzbrecher eine Abhängigkeit von der Brecherkennzahl  $\xi_d$  besteht ( $\sigma' = 20\%$ ).

$$\frac{z_{\text{auf}}}{H_S} = 0,8 + 0,6 \tanh(\xi_d - 2,1)$$

für:  $0,6 \leq \xi_d \leq 6,0$

Weitergehende Untersuchungen zum Ort des Auftreffpunktes sind für flachere bzw. steilere Neigungen erforderlich, um die Allgemeingültigkeit der empirischen Gleichung zu erweitern.

### 4.3 Prozesse auf der Deichaußenböschung

Im folgenden sollen die maßgebenden Parameter für die Beschreibung der Prozesse auf der Deichaußenböschung betrachtet werden (Abb. 4.7). Dies sind einerseits die Wellenaufbauhöhe und die Wellenablaufhöhe als Randbedingungen für die Aufbaubewegung, andererseits die Schichtdicken und Geschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung als maßgebende Parameter für die Belastung der Deichaußenböschung und als Eingangsparameter für die Beschreibung der Prozesse im Überlaufschwall.

Daher werden im folgenden zuerst die beiden Randbedingungen (Wellenaufbauhöhe und Wellenablaufhöhe) untersucht, deren Kenntnis für die Beschreibung der Geschwindigkeiten und Schichtdicken erforderlich ist.

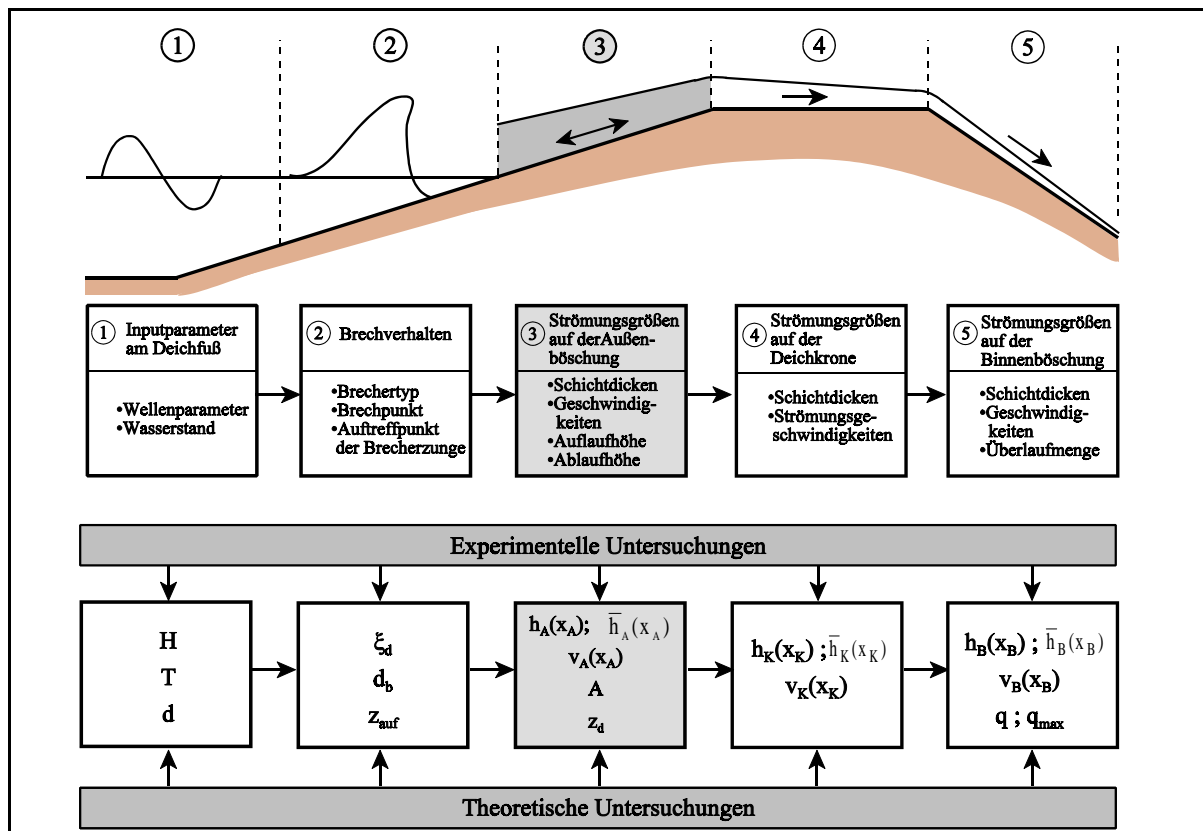


Abb. 4.7: Darstellung der Prozesse auf der Deichaußenböschung im Zusammenhang mit den Prozessen des Wellenüberlaufes

#### 4.3.1 Wellenaufbauhöhe

Nach dem Auftreffen der Brecherzunge auf die Deichaußenböschung läuft der Aufschwall auf der Böschung auf. Die Wellenaufbauhöhe  $A$  ist als vertikale Differenz zwischen höchstem Punkt des Wellenaufbauvorgangs und Ruhewasserspiegel definiert. Damit stellt die Wellenaufbauhöhe eine wichtige Randbedingung für die Beschreibung des Wellenüberlaufes dar, da

Wellenüberlauf nur eintritt, wenn die Freibordhöhe  $R_C$  kleiner als die Wellenaufbauhöhe  $A$  ist, die entsprechend der folgenden allgemeinen Funktion beschrieben werden kann:

$$\begin{aligned} \frac{A}{H} &= c_1 \cdot \xi_d \quad \text{für: } \xi_d \leq \xi_{gr} \\ \frac{A}{H} &= c_1 \cdot \xi_{gr} \quad \text{für: } \xi_d > \xi_{gr} \end{aligned} \quad (4.5)$$

mit  $\xi_{gr}$  = Brecherkennzahl am Übergang vom Sturz- zum Collapsing-Brecher entsprechend Tab. 4.2

Diese Gleichung wurde in zahlreichen Untersuchungen (z.B. *Van der Meer* (1995)) auf ihre Anwendbarkeit für die Beschreibung des Wellenaufbaues verifiziert. Nachteil von Gl. (4.5) ist der nicht differenzierbare Übergang vom Sturz- zum Collapsing-Brecher bei  $\xi_{gr}$ . *Van Gent* (1999) entwickelt zwar einen differenzierbaren Übergang für Gl. (4.5), bleibt aber weiterhin bei zwei Gleichungen. Daher soll im folgenden (i) das bestehende Verfahren auf seine Anwendbarkeit für flachgeneigte Deichböschungen überprüft werden und (ii) ein neues Verfahren zur Wellenaufbauberechnung entwickelt werden, das stetig und differenzierbar ist und damit die natürlichen Prozesse beim Brechvorgang besser berücksichtigt. Hierzu wird wie bereits für die Beschreibung des Brechpunktes und des Auftreffpunktes eine hyperbolische Funktion verwendet.

$$\frac{A}{H} = c_1 \tanh(c_1^* \cdot \xi_d) \quad (4.6)$$

Gl. (4.6) hat die gleichen physikalischen Randbedingungen wie Gl.(4.5). Für  $\xi_d \rightarrow 0$  wird  $A/H=0$  und für  $\xi_d \rightarrow \infty$  wird  $A/H=c_1$ .

Tab. 4.3 zeigt einen Vergleich der gemessenen Wellenaufbauhöhen mit dem bestehenden Verfahren (Werte für  $c_1$  nach *Van der Meer u. Janssen* (1995) für *Wellenspektren* und *Hunt* (1959) für *regelmäßige Wellen*) sowie der Funktion nach Gl. (4.6) für *regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren*. Aufgrund der relativ kleinen Anzahl von Wellen im Wellenspektrum (s. Abschnitt 3.3.3) kommt es insbesondere für  $A_{98}$  zu großen Streuungen in den Modellergebnissen (Abb. 4.8b). Hier sind weiterführende Modelluntersuchungen mit mehr Wellen erforderlich. Daher kann die Eignung von Gl. (4.6) im Rahmen dieser Arbeit deutlich nur für  $A_{50}$  bzw. für *regelmäßige Wellen* (Abb. 4.8a) aufgezeigt werden. Es zeigt sich, daß Gl. (4.6) den Übergang vom Sturz- zum Reflexionsbrecher erheblich besser beschreibt als das bislang übliche Verfahren.

Tab. 4.3: Versuchsergebnisse Wellenaufbau

	Auflauf- höhe	$c_1$	$c_1^*$	$\xi_{gr}^{*)}$	$\sigma'$	Gleichung	Autor
Wellenspektren	$A_{98}$	1,5	-	2,0	14%	(4.5)	Van der Meer
	$A_{98}$	3,0	0,65	-	13%	(4.6)	eigene Arbeit
	$A_{50}$	2,25	0,5	-	2,7%	(4.6)	eigene Arbeit
	$A_{50}$	1,0	-	2,3	12%	(4.5)	Hunt
regelmäßige Wellen	A	2,25	0,5	-	16%	(4.6)	eigene Arbeit
	A	1,0	-	2,3	14%	(4.5)	Hunt

\*) Die Grenzbrecherkennzahl  $\xi_{gr}$  wird hier wie von Van der Meer et al. (1995) bzw. Hunt (1959) definiert verwendet, um einen sauberen Vergleich der bestehenden Verfahren mit den Versuchsdaten durchführen zu können. Aus diesem Grund wird auf die Verwendung der in Tab. 4.2 definierten Grenzbrecherkennzahl  $\xi_{gr}$  verzichtet.

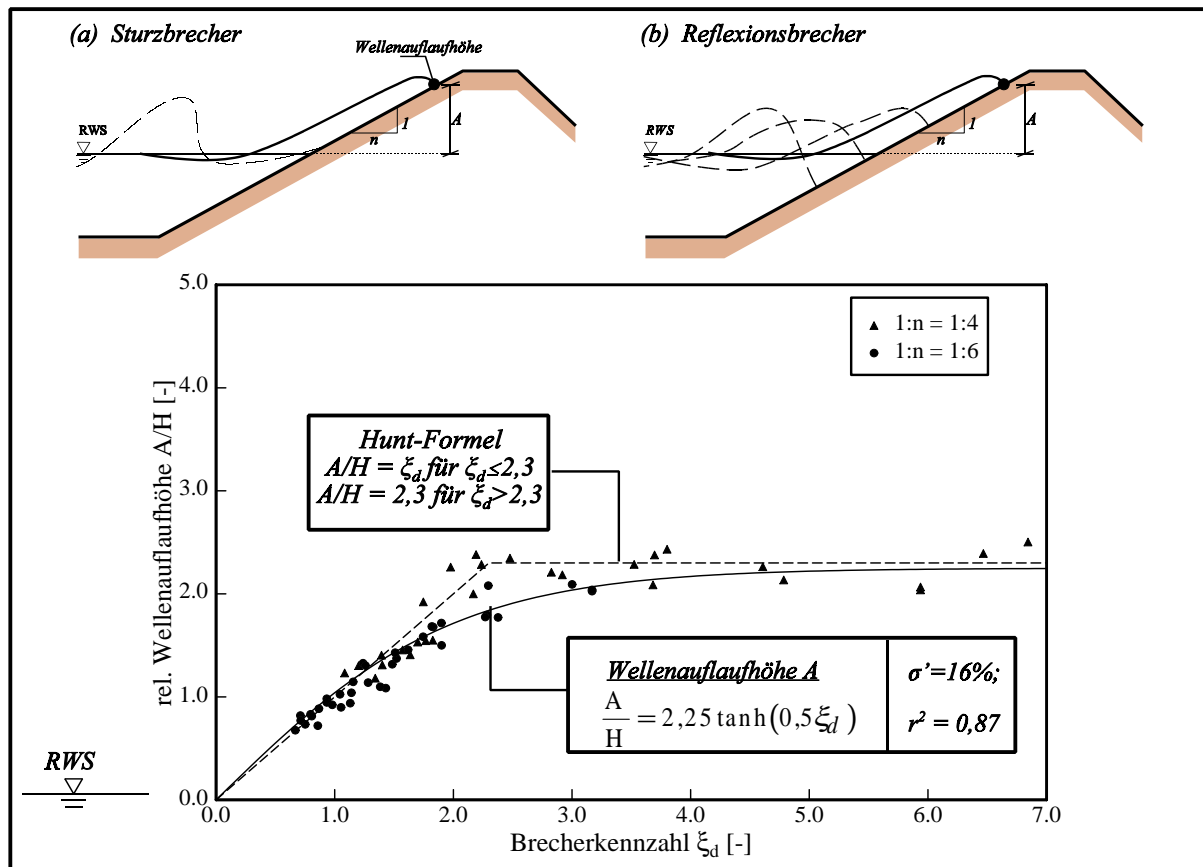


Abb. 4.8a: Darstellung der Wellenaufbauhöhe für regelmäßige Wellen

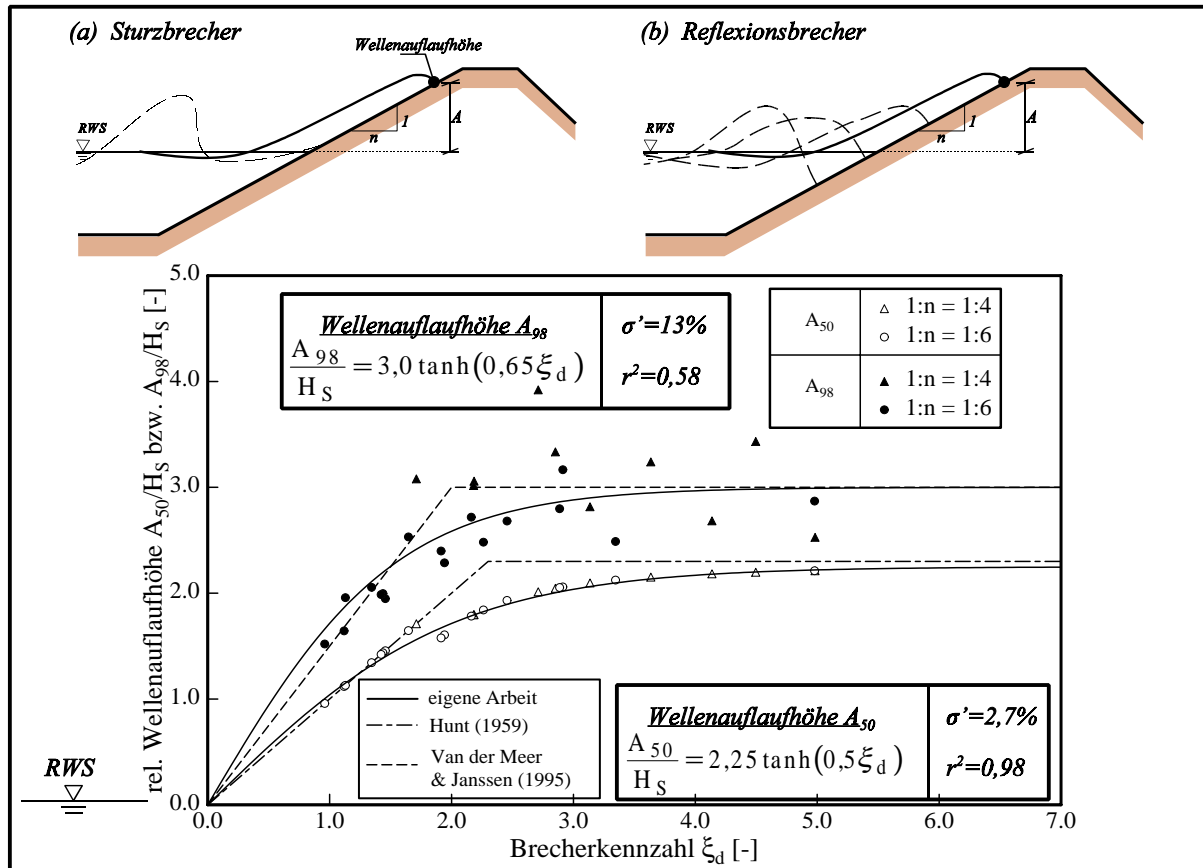


Abb. 4.8b: Darstellung der Wellenaufbauhöhe für Wellenspektren

### 4.3.2 Wellenablaufhöhe

Als Wellenablaufhöhe  $z_d$  wird im folgenden der höchste Punkt auf der Böschung definiert, der während des gesamten Wellenauf- und Wellenablaufvorgangs mit Wasser bedeckt ist (Abb. 4.9). Diese Definition wurde bereits von *Bruun u. Günbak* (1976), *Tautenhain* (1981) und *Schulz* (1992) verwendet.

Die Darstellung der Versuchsergebnisse in Abb. 4.10 zeigt, daß es für Sturzbrecher zu einer Überlagerung der auflaufenden mit der ablaufenden Welle kommt. Für Sturzbrecher trifft die Brecherzunge auf ein Wasserpolster und somit auf rücklaufendes Wasser. Dadurch kommt es zu starken Turbulenzen, die mit Energiedissipation und einer entsprechend reduzierten Wellenaufbauhöhe verbunden sind. In diesem Bereich können daher auch Wellenablaufhöhen oberhalb des Ruhewasserspiegels (RWS) auftreten. Für Reflexionsbrecher ist der Wellenablauf der vorhergehenden Welle bereits beendet, wenn die nachfolgende Welle auf der Böschung aufläuft. Dadurch kommt es zu keiner erhöhten Energiedissipation und die Welle kann höher auf

der Böschung auflaufen als beim Sturzbrecher. Damit kann die Wellenablaufhöhe  $z_d$  für Reflexionsbrecher der Höhenlage des Brechpunktes  $d_b$  gleichgesetzt werden.

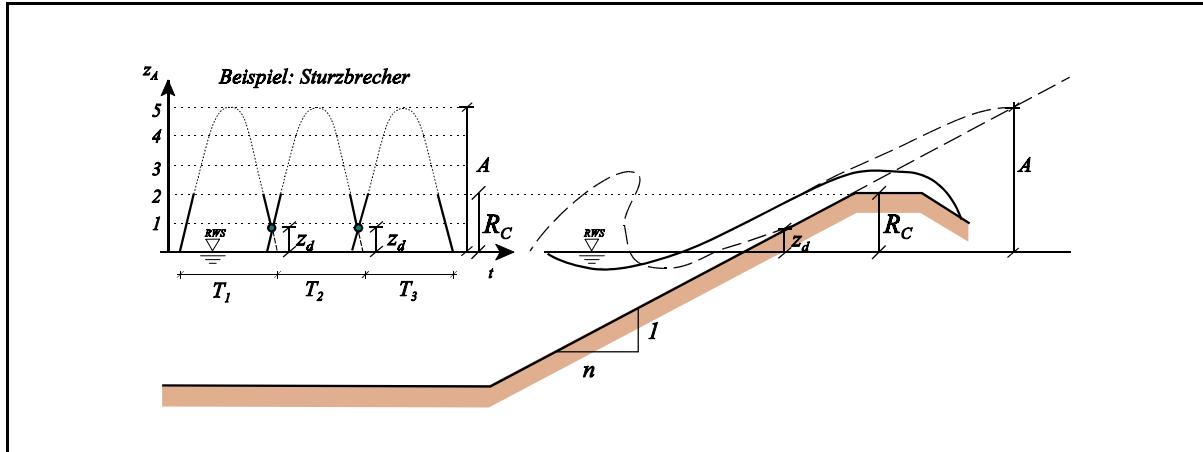


Abb. 4.9: Definition der Wellenablaufhöhe aus dem Wellenaufbausignal

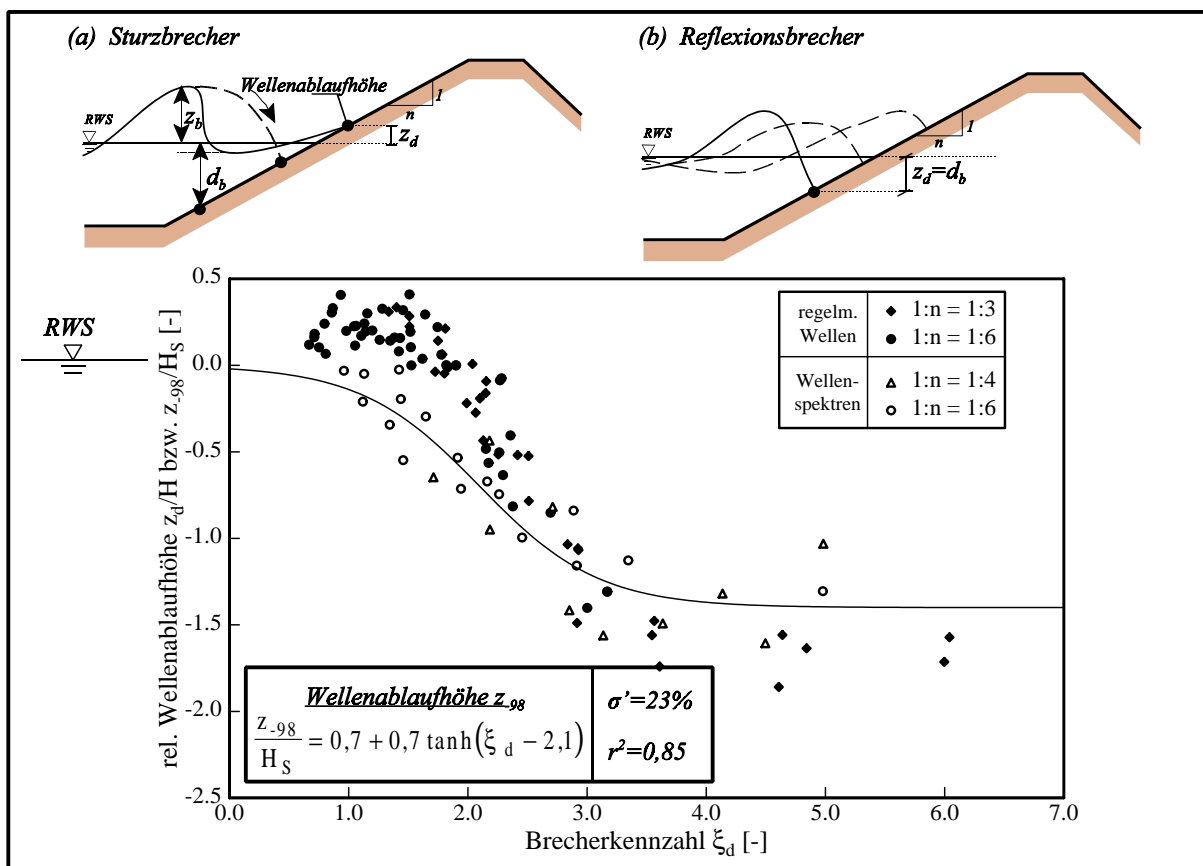


Abb. 4.10: Darstellung der Wellenablaufhöhe

Als Ausgleichsfunktion für Wellenspektren konnte die folgende empirische Funktion ermittelt werden, die für kleine Brecherkennzahlen  $\xi_d$  gegen Null strebt und für große Brecherkennzahlen



$\xi_d$  einen festen Wert annimmt, der dem Brechpunkt der anlaufenden Welle entspricht ( $r^2=0,85$ ;  $\sigma'=23\%$ ):

$$\frac{z_{-98}}{H_S} = 0,7 + 0,7 \tanh(\xi_d - 2,1) \quad (4.7),$$

wobei  $z_{-98}$  der tiefsten Wellenablaufhöhe eines Wellenspektrums entspricht. Aufgrund der Natur eines Wellenspektrums bestimmen die Wellen mit langer Periode die Wellenablaufhöhe  $z_{-98}$ . Dies erklärt, warum Wellenablaufhöhen bei *Wellenspektren* etwas niedriger als bei *regelmäßigen Wellen* gleicher Brecherkennzahl sind.

Kommt es zum Wellenüberlauf, so geht das überlaufende Wasser für den Wellenablauf verloren. Für diesen Fall kann die folgende Randbedingung formuliert werden:

$$z_{-98} \leq R_C$$

Dieser Fall trat bei den vorliegenden Untersuchungen nur für  $R_C=0$  ein. Für  $R_C=0,05\text{m}$  kann die relative Wellenablaufhöhe  $z_{-98}/H_S$  nach Gl. (4.7) berechnet werden.

### 4.3.3 Strömungsfeld auf der Deichaußenböschung

Ziel der Arbeit ist die Beschreibung der Strömungsparameter im Wellenüberlauf. Für die Ermittlung der Initialbedingungen am Beginn der Deichkrone:

- (i) Mittlere Schichtdicke  $h_k(x_K=0)$  bzw. mittlere Wasserüberdeckung  $\bar{h}_K(x_K=0)$
- (ii) Überlaufgeschwindigkeit  $v_K(x_K=0)$  bzw. mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}_K(x_K=0)$

ist zuerst die Beschreibung des Auflaufschwalls auf der Deichaußenböschung erforderlich. Daher sollen im folgenden Abschnitt die maßgebenden Auflaufgeschwindigkeiten und Schichtdicken auf der Deichaußenböschung (vom RWS ( $x_A=0$ ) bis zum Beginn der Deichkrone ( $x_K=0$ )) ermittelt werden. Die maßgebenden Strömungsparameter sind in Abb. 4.11 in Zusammenhang mit den Schadensursachen dargestellt.

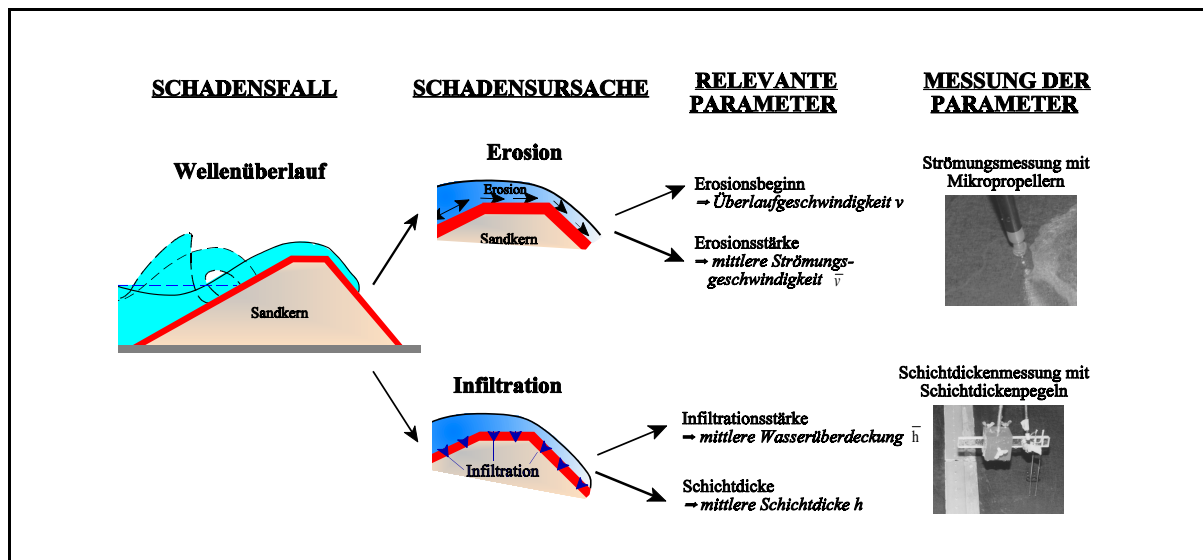


Abb. 4.11: Meßtechnische Erfassung der relevanten Parameter für Erosion und Infiltration

Im Zusammenhang mit der Ermittlung der Strömungsgrößen auf der Deichaußenböschung soll überprüft werden, ob die allgemeinen Erkenntnisse zur Entwicklung der Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten im Wellenaufbau (Abschnitt 2.3) auf der Deichaußenböschung (ohne Wellenüberlauf) auch auf Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung bei Wellenüberlauf übertragen werden können bzw. welche Modifikationen erforderlich sind. Zu diesem Zweck sollen die folgenden Aspekte überprüft werden:

- Kann die Abnahme der Auflaufgeschwindigkeit  $v_A$  in erster Näherung anhand einer einfachen Energiegleichung beschrieben werden (Abschnitt 2.3.1)?
- Ist die Schichtdicke  $h_A$  auf der Deichaußenböschung eine lineare Funktion der Auflauflänge (Abschnitt 2.3.2)?

#### 4.3.3.1 Schichtdicken auf der Deichaußenböschung

##### (a) Für Sturzbrecher

Die horizontale Projektion  $x_z$  der böschungsparellen Wellenaufbauflänge kann aus der Wellenaufbauhöhe  $A$  für Sturzbrecher ( $\xi_d \leq \xi_{gr}$ ) unter Verwendung der folgenden allgemeinen Wellenaufbau-Formel (s. Gl. (4.5)):

$$\frac{A}{H} = c_1 \cdot \xi_d = c_1 \cdot \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (4.8)$$

mit:  $c_1 = 1,5$  für Wellenspektren (bzw.  $c_1=1,0$  für regelmäßige Wellen)

und nach mehreren Umformungen zu:

$$x_Z = c_1 \cdot \sqrt{H \cdot L_0} \quad (4.9)$$

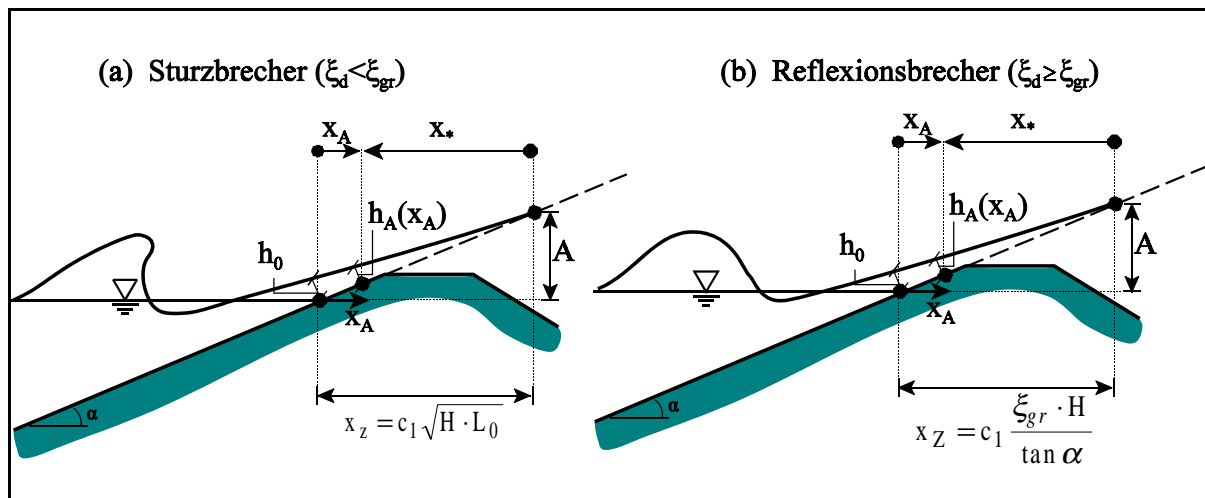
berechnet werden (Abb. 4.12). Unter der Annahme einer linearen Abnahme der Schichtdicke  $h_A$  mit der Auflauflänge  $x_Z$  ergibt sich folgende Gleichung zur Bestimmung der Schichtdicke auf der Deichaußenböschung:

$$\frac{h_A(x_A)}{x_Z} = c_2 \left( 1 - \frac{x_A}{x_Z} \right) = c_2 \left( 1 - \frac{x_A}{c_1 \cdot \sqrt{H \cdot L_0}} \right) \quad (4.10)$$

mit:  $h_A$  = Schichtdicke [m]  
 $c_2$  = Steigungsmaß [-]  
 $x_A$  = horizontale Koordinate mit  $x_A=0$  am RWS  
 $x_Z$  = horizontale Projektion der Wellenaufauflänge A

Mit der Restafluflänge  $x_* = x_Z - x_A$  nach Abb. 4.12 folgt aus Gl. (4.10):

$$h_A(x_*) = c_2 (x_Z - x_A) = c_2 \cdot x_* \quad (4.11)$$



**Abb.4.12:** Schichtdickenentwicklung auf der Deichaußenböschung bei Sturz- und Reflexionsbrechern (Definitionsskizze)

## (b) Für Reflexionsbrecher

Für Reflexionsbrecher ( $\xi_d > \xi_{gr}$ ) zeigen Wellenaufauflaufuntersuchungen einen Grenzwert ( $A/H = c_1 \cdot \xi_{gr}$ ) der relativen Wellenaufauflänge ( $A/H$ ). Entsprechend Gl. (4.9) folgt damit die horizontale Projektion  $x_Z$  der böschungsparellen Wellenaufauflänge zu:

$$x_Z = c_1 \cdot \frac{\xi_{gr} \cdot H}{\tan \alpha} \quad (4.12)$$

Da auch für Reflexionsbrecher eine lineare Abnahme der maximalen Schichtdicke  $h_A$  mit der Wellenaufauflänge  $x_Z$  angesetzt werden kann (Abb. 4.12), folgt:

$$\frac{h_A(x_A)}{x_Z} = c_2 \left( 1 - \frac{x_A}{x_Z} \right) = c_2 \left( 1 - \frac{x_A \cdot \tan \alpha}{c_1 \cdot \xi_{gr} \cdot H} \right) \quad (4.13)$$

und mit der Restaufauflänge  $x_*(x_Z - x_A)$  nach Abb. 4.12 folgt aus Gl. (4.13):

$$h_A(x_*) = c_2 (x_Z - x_A) = c_2 \cdot x_* \quad (4.14)$$

Aus Gl. (4.11) und (4.14) folgt somit, daß das Steigungsmaß  $c_2$  für Sturz- und Reflexionsbrecher aufgrund der Kontinuität für  $\xi_d = \xi_{gr}$  gleich sein muß und der Einfluß des Brechverhaltens über die Abnahme der Schichtdicke ( $x_A/x_Z$ ) in Gl. (4.13) bzw. (4.10) berücksichtigt wird.

Eine Verifizierung der dargestellten Zusammenhänge (Gl. (4.10) bis (4.14)) anhand der Modellversuche führt zu den folgenden allgemeinen Aussagen (Abb. 4.13):

- Die Schichtdicke  $h_A(x_A)$  nimmt linear mit der Restaufauflänge  $x_*$  zu.
- Das Steigungsmaß  $c_2$  ist für Sturz- und Reflexionsbrecher gleich.
- Das Steigungsmaß  $c_2$  ist eine Funktion der Deichneigung  $n$ . Dabei gilt:

$$c_2^* = c_2 \cdot n = \text{konst.} \quad (4.15)$$

Ein Nachweis für die Proportionalität zwischen Steigungsmaß  $c_2$  und Neigung der Außenböschung  $n$  kann anhand der Gleichung  $q = v_A \cdot h_A = \text{konst.}$  erbracht werden. Da  $v_A$  proportional  $1/n$  ist (s. Gl. 4.19), muß  $h_A$  proportional  $n$  sein. Dies kann für *regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren* aber auch für verschiedene statistische Schichtdickenparameter ( $h_{A,50}$ ,  $h_{A,98}$ ,  $\bar{h}_A$ ) bestätigt werden (Abb. 4.13). Eine Abhängigkeit der Schichtdicke von der Deichneigung  $n$  konnte in früheren Untersuchungen nicht festgestellt werden (Roos u. Battjes, 1976; Tautenhain, 1981; Waal, 1996). Dies liegt daran, daß frühere Untersuchungen jeweils nur an einer Deichneigung durchgeführt worden sind und somit der Einfluß der Deichneigung  $n$  nicht berücksichtigt wurde.

- Zwischen mittlerer Schichtdicke  $h_{A,50}$  und mittlerer Wasserüberdeckung  $\bar{h}_A$  besteht folgender Zusammenhang:

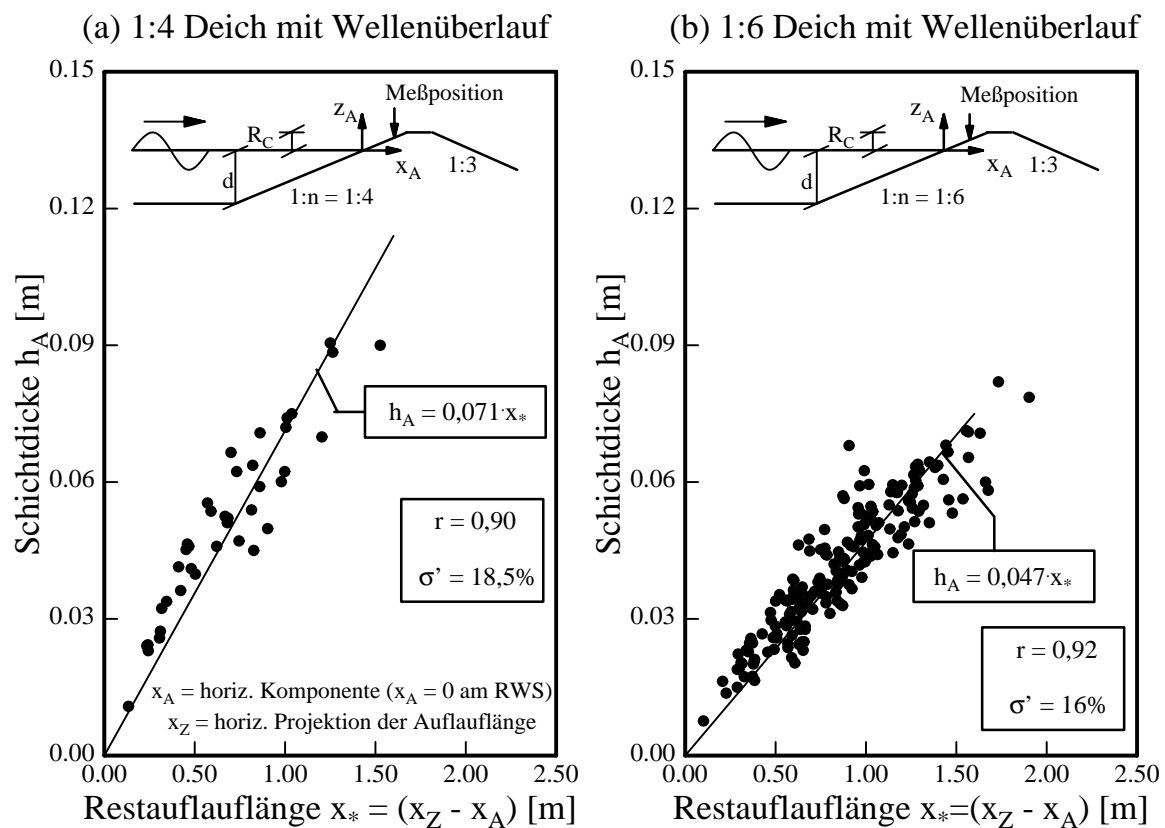
$$\text{Wellenspektren:} \quad h_{A,50} \approx 3,5 \bar{h}_A \quad (4.16a)$$

$$\text{Regelmäßige Wellen:} \quad h_{A,50} \approx 2,4 \bar{h}_A \quad (4.16b)$$

Dabei stellt der Wert  $\bar{h}_A$  eine „quasistationäre“ Wasserbedeckung der Deichböschung dar, da  $\bar{h}_A$  über die Zeit  $t_{ref}$  gemittelt wurde.

- Es ist kein signifikanter Unterschied in der Schichtdicke zwischen gleichen Versuchen mit bzw. ohne Wellenüberlauf festzustellen.

Überlagert wird der Schichtdickenverlauf nach Gl. (4.11) bzw. (4.14) von kurzperiodischen Oberflächenwellen, wie sie z.B. auch aus der allgemeinen Hydraulik im Fall einer schießenden Strömung bekannt sind. Oberflächenwellen im Wellenauf- und Wellenüberlauf treten nur bei Sturzbrechern auf und sind bei Reflexionsbrechern aufgrund der relativ „gleichmäßigen“ Strömung nicht vorhanden. Ihre Perioden betragen zwischen 0,40s und 1,20s bei Höhen bis zu 2,0cm. Eine weitergehende Auswertung dieser Wellen wurde nicht vorgenommen. Das Auftreten dieser Wellen erschwert die Auswertung der Schichtdicken und ist ein Grund für die Streuungen in den Meßergebnissen.



**Abb. 13a:** Schichtdicken des Auflaufschwells als Funktion der Restauflänge  $x_*$  für regelmäßige Wellen mit Wellenüberlauf

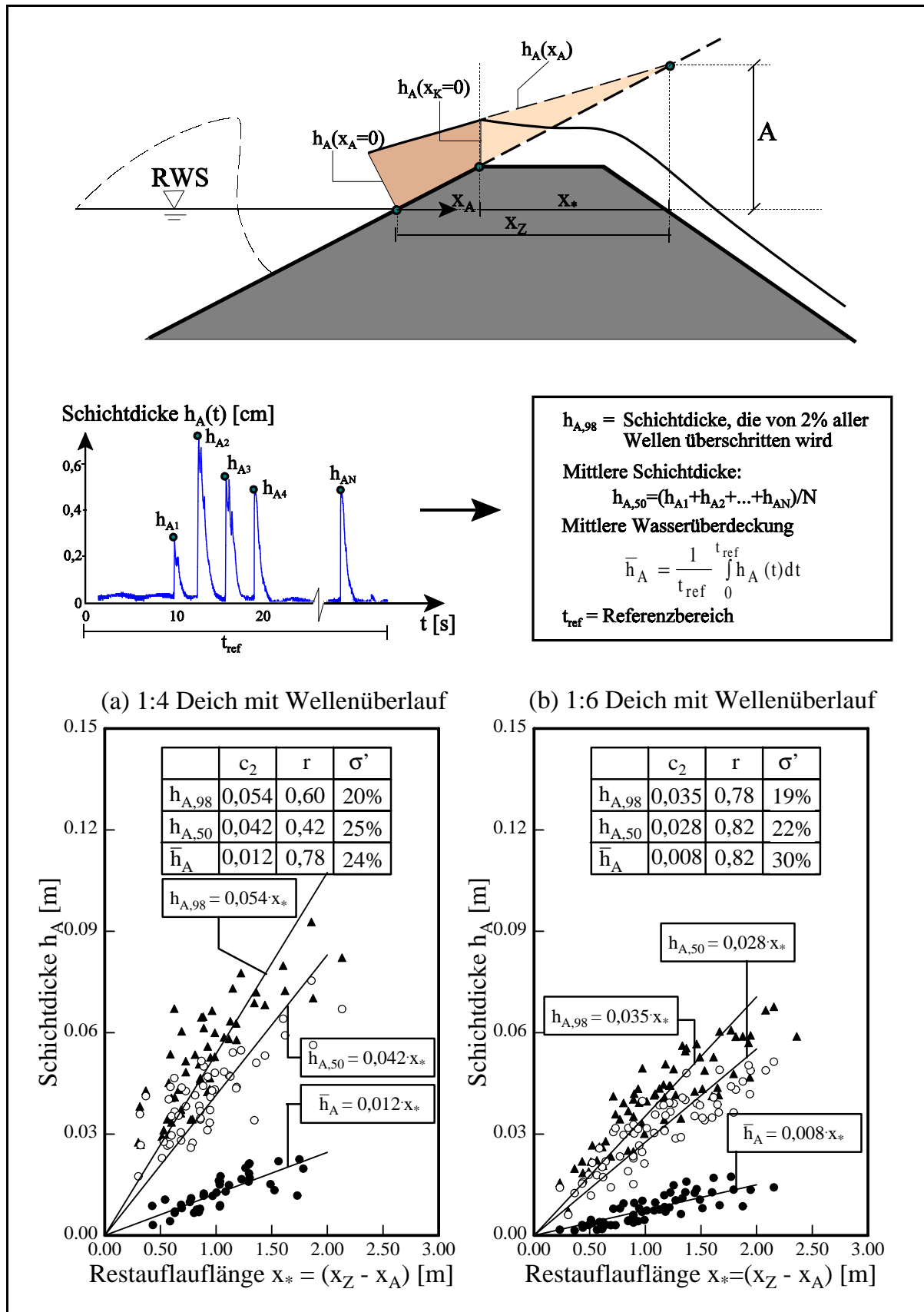


Abb. 4.13b: Schichtdicken des Auflaufschwells ( $h_{A,98}$ ;  $h_{A,50}$ ;  $\bar{h}_A$ ) als Funktion der Restauflauflänge  $x_*$  für Wellenspektren mit Wellenüberlauf

#### 4.3.3.2 Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung

Neben der Schichtdicke am Übergang von der Deichaußenböschung zur Deichkrone stellt die Auflaufgeschwindigkeit an gleicher Position den zweiten wesentlichen Parameter zur Beschreibung der physikalischen Prozesse im Überlaufschwall dar. Daher wird im folgenden die Entwicklung der Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung betrachtet.

Die Geschwindigkeit des Auflaufschwells stellt die maximale Geschwindigkeit dar, die während der Auflaufbewegung an einem beliebigen Ort auftritt (Abschnitt 2.3.1). Diese Geschwindigkeit ist maßgebend für den Erosionsbeginn der Deichoberfläche und somit eine wichtige Größe zur Beschreibung der Belastung von Seedeichen.

Die Auflaufgeschwindigkeit  $v_A$  an einer beliebigen Position auf der Deichaußenböschung kann aus der Wellenauflaufhöhe  $A$  zu (s. Gl. (2.4) in Abschnitt 2.3.1):

$$v_A = k^* \sqrt{2 g (A - z_A)} \quad (4.17)$$

abgeschätzt werden. Durch Umstellung nach  $(v_A/(\pi H/T))$  folgt:

$$\frac{v_A}{\left(\frac{\pi H}{T}\right)} = \frac{2 \cdot k^* \cdot n}{\sqrt{\pi}} \xi_d \sqrt{\frac{(A - z_A)}{H}} \quad (4.18)$$

Die Faktoren vor der Brecherkennzahl  $\xi_d$  auf der rechten Seite von Gl. (4.18) können zu einem Koeffizienten  $a_0$  zusammengefaßt werden:

$$a_0 = \frac{2 \cdot k^*}{\sqrt{\pi}} \cdot n = a_0^* \cdot n \quad (4.19)$$

Damit wird auch die Abhängigkeit des Steigungsmaßes  $c_2^*$  ( $c_2 = c_2^*/n$ ) von der Deichneigung  $n$  nach Gl. (4.15) bestätigt. Aufgrund der Kontinuität nimmt  $a_0$  umgekehrt proportional zu  $c_2$  mit der Deichneigung  $n$  zu.

Die Gleichung zur Ermittlung der Auflaufgeschwindigkeit auf der Deichaußenböschung folgt schließlich zu:

$$\frac{v_A}{\left(\frac{\pi H}{T}\right)} = a_0^* n \xi_d \sqrt{\frac{(A - z_A)}{H}} \quad (4.20)$$

Gl. (4.20) wird zu Null am höchsten Punkt des Wellenauflaufes ( $z_A = A$ ) und maximal am RWS ( $z_A = 0$ ).

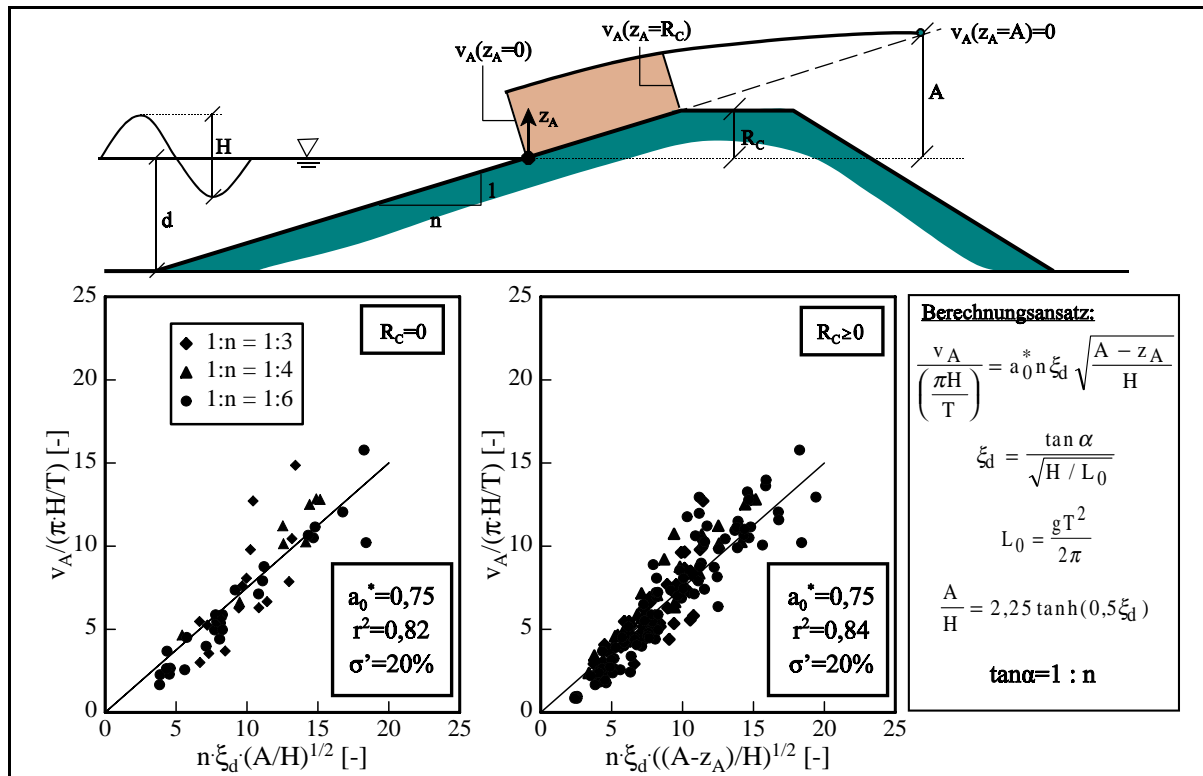


Abb. 4.14a: Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung für *regelmäßige Wellen*

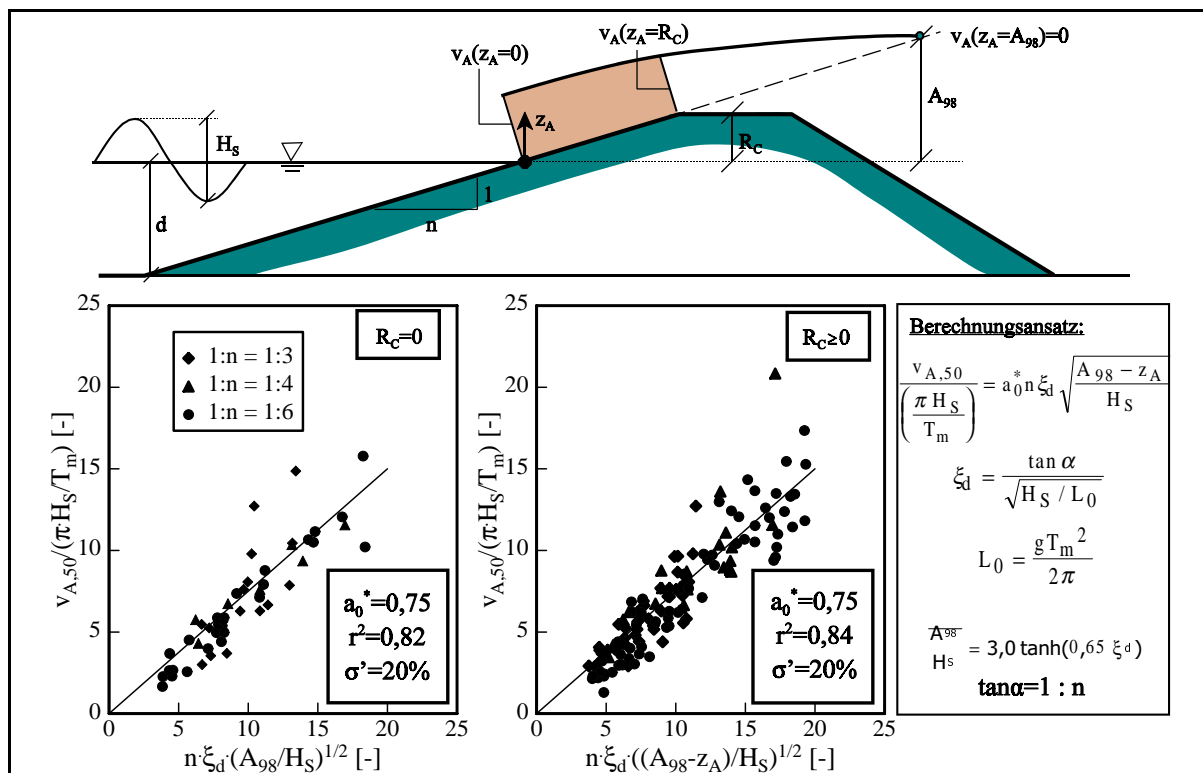


Abb. 4.14b: Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung für *Wellenspektren*



In den Abb. 4.14a (*regelmäßige Wellen*) und 4.14b (*Wellenspektren*) sind die Modellergebnisse zu den Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung aufgetragen. Der Koeffizient  $a_0$  wurde durch Regressionsrechnung zu  $a_0=0,75$  bestimmt. Damit kann die Auflaufgeschwindigkeit am Übergang von der Deichaußenböschung zur Deichkrone anhand der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

(i) *Regelmäßige Wellen* ( $\sigma' = 20\%$ )

$$\frac{v_A}{\left(\frac{\pi H}{T}\right)} = 0,75 \cdot \xi_d \sqrt{\frac{(A-R_C)}{H}} \quad \text{für } A \geq R_C \quad (4.21a)$$

(ii) *Wellenspektren* ( $\sigma' = 20\%$ )

$$\frac{v_{A,50}}{\left(\frac{\pi H_s}{T_m}\right)} = 0,75 \cdot \xi_d \sqrt{\frac{(A_{98}-R_C)}{H_s}} \quad \text{für } A_{98} \geq R_C \quad (4.21b)$$

#### 4.3.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Prozesse auf der Deichaußenböschung wurden als Eingangsparameter für den Wellenüberlaufschwall auf der Deichkrone untersucht. In diesem Zusammenhang wurden zuerst die **Wellenaufbauhöhe**  $A$  und die Wellenablaufhöhe  $z_d$  als physikalische Randbedingungen des Auflaufschwalls analysiert. Zur Berechnung des Wellenaufbaus wurde empirisch eine vollständig differenzierbare Gleichung entwickelt, um Unstetigkeiten in der Differenzierbarkeit bestehender Modelle zu vermeiden ( $\sigma'=13\%$ ).

$$\frac{A_{98}}{H_s} = 3,0 \tanh(0,65 \cdot \xi_d)$$

Eine Überprüfung mit dem allgemein anerkannten Verfahren nach *Van der Meer* (1995) ergibt ebenfalls eine gute Anpassung ( $\sigma'=14\%$ ).

Anschließend wurden die Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung bis zur Deichkrone ermittelt. Diese Parameter stellen die eigentlichen Eingangsparameter für das Strömungsfeld des Wellenüberlaufs dar. Die **Schichtdicken** nehmen linear vom RWS bis zur Wellenaufbauhöhe  $A$  ab und zeigen eine Proportionalität zur Deichneigung  $1/n$ :

$$h_A = \frac{c_2^*}{n} x_* \quad \text{für } 3 < n < 6$$

mit:  $x_* = x_Z - x_A$  (Restauflauflänge)

$$\begin{aligned} c_2^* &= 0,216 \text{ für } h_{A,98} \text{ mit } \sigma' = 20\% \\ c_2^* &= 0,168 \text{ für } h_{A,50} \text{ mit } \sigma' = 23\% \\ c_2^* &= 0,048 \text{ für } \bar{h}_A \text{ mit } \sigma' = 27\% \end{aligned}$$

Ein signifikanter Unterschied in den Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten zwischen Versuchen mit und ohne Wellenüberlauf konnte nicht festgestellt werden. Ein Vergleich mit bestehenden Verfahren zeigt eine gute Übereinstimmung der Meßergebnisse mit den Ergebnissen von *Tautenhain* (1981) für *regelmäßige Wellen* ( $c_2^* = 0,246$ ) und *Waal* (1996) für *Wellenspektren* ( $c_2^* = 0,163$  für  $h_{A,50}$ ).

Die Variation der **Auflaufgeschwindigkeiten** auf der Deichaußenböschung wurde anhand einer einfachen Bernoulli-Energiegleichung ermittelt. Der Einfluß der Reibung wurde empirisch aufgrund der Modellversuche bestimmt ( $\sigma' = 20\%$ ).

$$\frac{v_{A,50}}{\left( \frac{\pi H_S}{T_m} \right)} = 0,75 \cdot \xi_d \sqrt{\frac{A_{98} - z_A}{H_S}}$$

Auch die Ergebnisse zu den Auflaufgeschwindigkeiten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen von *Führböter u. Witte* (1989) aus dem Großen Wellenkanal (GWK) ( $a_0^* \approx 0,72$  für  $v_{A,50}$ ). Wellenablaufgeschwindigkeiten wurden nicht untersucht, da sie für die weitere Zielsetzung nicht relevant sind.

Da die Versuche im Wellenkanal nur mit relativ kurzen Wellenzügen durchgeführt werden konnten, werden weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der statistischen Variabilität von Schichtdicke, Auflaufgeschwindigkeit und Wellenaufbauhöhe empfohlen. Eine Überprüfung des Verfahrens für andere Böschungsrauheiten sowie die Bestimmung von Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten im Bereich der Wellenaufbauhöhe  $A_{98}$  auf der Grundlage großmaßstäblicher Modellversuche (keine Maßstabeffekte für kleine Wellenüberlaufmengen (s. Abschnitt 3.1)) ist ebenso erforderlich.

#### 4.4 Strömungsfeld auf der Deichkrone

Am Übergang von der Deichaußenböschung zur Deichkrone trennt sich der Auflaufschwall in zwei Strömungsfelder. Das Wasser, das beim Wellenauflauf diesen Punkt überschreitet, fließt überwiegend als Wellenüberlauf auf Deichkrone und Deichbinnenböschung ab. Das im Wellenauflauf verbleibende Wasser fließt als Wellenablauf zurück. Visuell kann auch beobachtet werden, daß eine geringe Wassermenge von der Deichkrone zurück auf die Deichaußenböschung fließt. Daher findet die Ermittlung der mittleren Wellenüberlaufsraten auch erst in Abschnitt 4.5.1 statt.

Im folgenden soll der Wellenüberlaufschwall auf der Deichkrone näher analysiert werden. Hierfür werden Schichtdicken und Geschwindigkeiten unabhängig voneinander betrachtet (Abb. 4.15).

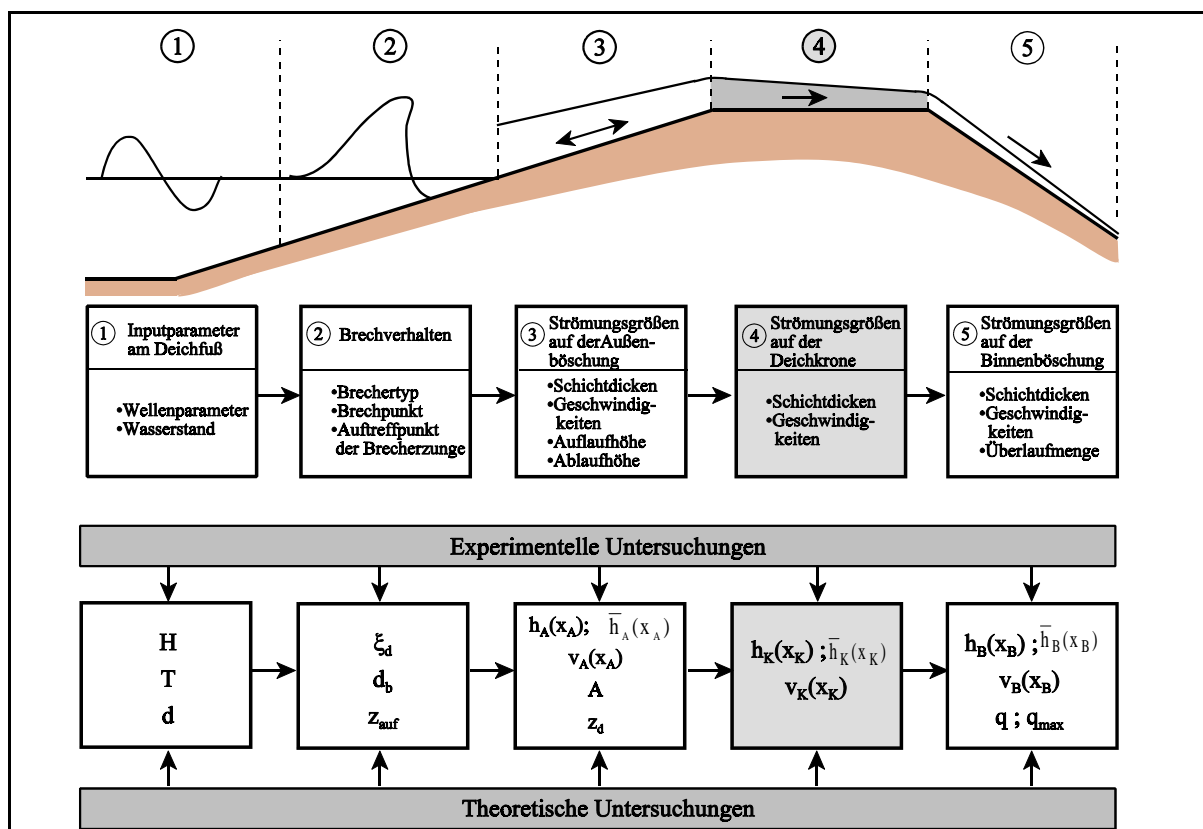


Abb. 4.15: Darstellung der Prozesse auf der Deichkrone im Zusammenhang mit den Prozessen des Wellenüberlaufes

#### 4.4.1 Schichtdicken auf der Deichkrone

Die Schichtdicke  $h_K(x_K=0)$  am Beginn der Deichkrone wird bestimmt von der Ausgangsschichtdicke  $h_A(x_A=n \cdot R_C)$  am Übergang von der Deichaußenböschung zur Deichkrone und kann anhand von Gl. (4.11) und (4.14) durch Umrechnung in eine kronennormale Komponente ermittelt werden:

$$h_K(x_K=0) = h_A(x_A=n \cdot R_C) \cdot \cos \alpha \quad (4.22)$$

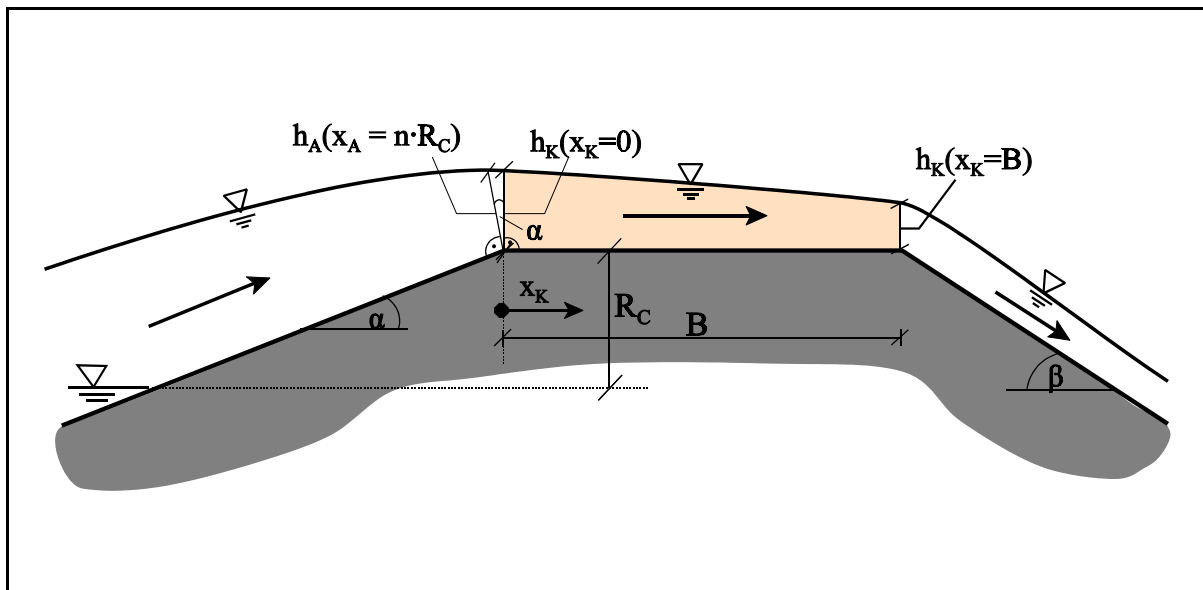


Abb. 4.16: Definition der Schichtdicke  $h_K$  des Überlaufschwells auf der Deichkrone

Auf der Deichkrone selber stellen die Breite der Deichkrone  $B$  sowie der Weglänge  $x_K$  (Abb. 4.16) die wesentlichen Einflußfaktoren auf die Entwicklung der Schichtdicke  $h_K$  dar. Weglänge  $x_K$  und Kronenbreite  $B$  wurden im Rahmen der Dimensionsanalyse zum dimensionslosen Term  $x_K/B$  zusammengefaßt ( $0 \leq x_K/B \leq 1$ ). Daraus folgt, daß die Schichtdicke  $h_K(x_K)$  anhand der folgenden allgemeinen Funktion ermittelt werden kann:

$$\frac{h_K(x_K)}{h_K(x_K=0)} = f \left( \frac{x_K}{B} \right) \quad (4.23)$$

mit:  $h_K(x_K)$  = Schichtdicke auf der Deichkrone  
 $x_K$  = Koordinate auf der Deichkrone mit  $x_K=0$  am Beginn und  $x_K=B$  am Ende der Deichkrone  
 $B$  = Breite der Deichkrone

Entsprechend der Untersuchungen für die Deichaußenböschung wurde der  $c_2$ -Wert für die verschiedenen Positionen auf der Deichkrone ermittelt und in Abb. 4.17 als Verhältniswert

$c_2(x_K)/c_2(x_K=0)$  über  $x_K/B$  dargestellt<sup>4.1.)</sup>.

$$\frac{h_k(x_K)}{h_k(x_K=0)} = \frac{c_2(x_K)}{c_2(x_K=0)} = \exp\left(-c_3 \frac{x_K}{B}\right) \quad (4.24)$$

mit:  $c_3 = 0,75$  ;  $r^2 = 0,88$ ;  $\sigma' = 6,6\%$  für *Wellenspektren*  
 $c_3 = 0,75$  ;  $r^2 = 0,97$ ;  $\sigma' = 4,0\%$  für *regelm. Wellen*

Die Abnahme der Schichtdicke hängt mit der Deformation des Überlaufschwells auf der Deichkrone zusammen. Während am Beginn der Deichkrone ein Teil des Wassers wieder auf der Deichaußenböschung abläuft, fließt der verbleibende Teil als Wellenüberlauf über die Deichkrone. Die Schichtdicke der Überlaufzunge wird auf der Deichkrone immer dünner, da es sich um keine stationäre Strömung handelt, sondern um ein begrenztes Wasservolumen, das über die Deichkrone läuft und sich dabei auseinanderzieht. Eine Analogie zur Dammbbruchwelle verdeutlicht diesen Vorgang. Die Stärke der Front der Dammbbruchwelle nimmt mit zunehmender Entfernung zur Bruchstelle ab. Daher ist die Schichtdicke am Beginn der Deichkrone höher als am Ende der Deichkrone.

Der exponentielle Term in Gl. (4.24) gibt die Verformung des Überlaufschwells auf der Deichkrone in Abhängigkeit der Schichtdicke am Beginn der Deichkrone an. Gl. (4.24) konnte für *regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren*, für Sturz- und Reflexionsbrecher ( $c_2$  gilt für Sturz- und Reflexionsbrecher (s. Abschnitt 4.3.3.1)) und verschiedene statistische Parameter ( $h_{k,98}$ ;  $h_{k,50}$  (Abb. 4.17)) verifiziert werden. Dies bestätigt die Annahmen in Gl. (4.23), daß die entwickelte Transferfunktion in Gl. (4.24) für die örtliche Entwicklung der Schichtdicken auf der Deichkrone nur eine Funktion der Schichtdicke am Beginn der Deichkrone ( $h_k(x_K=0)$ ) und des Ortes auf der Deichkrone ( $x_K/B$ ) ist.

Damit kann Gl. (4.24) in gleicher Form auch auf die mittlere Wasserüberdeckung  $\bar{h}_k$  angewandt werden, die einer „quasi-stationären Überströmung“ der Deichkrone entspricht.

In diesem Fall gilt:

$$\frac{\bar{h}_k(x_K)}{\bar{h}_k(x_K=0)} = \exp\left(-0,75 \frac{x_K}{B}\right) \quad (4.25)$$

mit:  $r^2 = 0,97$ ;  $\sigma' = 5,7\%$  für *regelm. Wellen* und *Wellenspektren*

---

<sup>4.1.)</sup> Die vollständige Gleichung zur Bestimmung von  $h_k(x_K)$  lautet:  $h_k(x_K) = c_2(x_K) \cdot x_*$ . Da  $x_*$  durch  $(x_Z - R_C \cdot n)$  ersetzt wird, hat  $x_*$  für jede Position auf der Deichkrone den gleichen Wert.

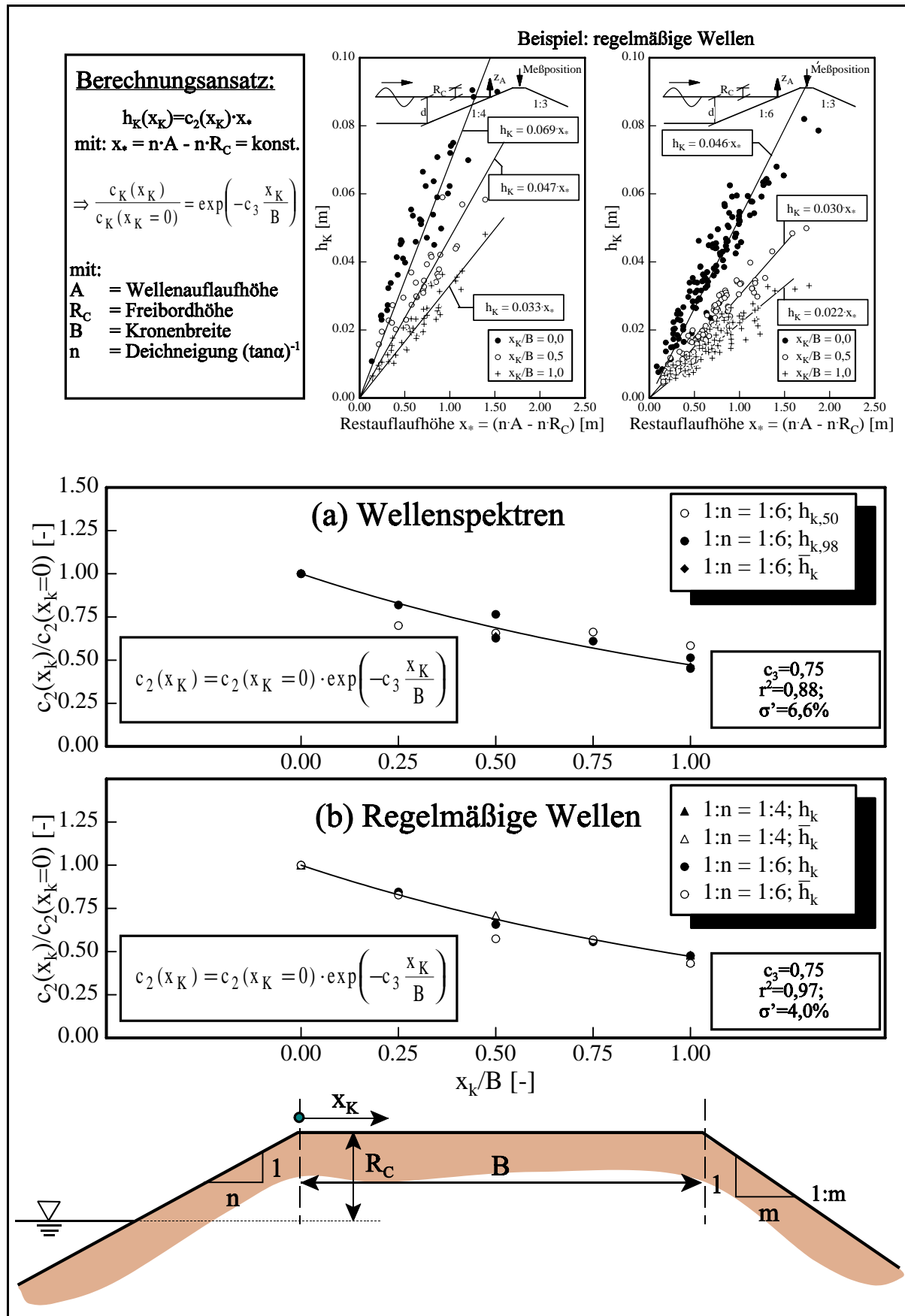


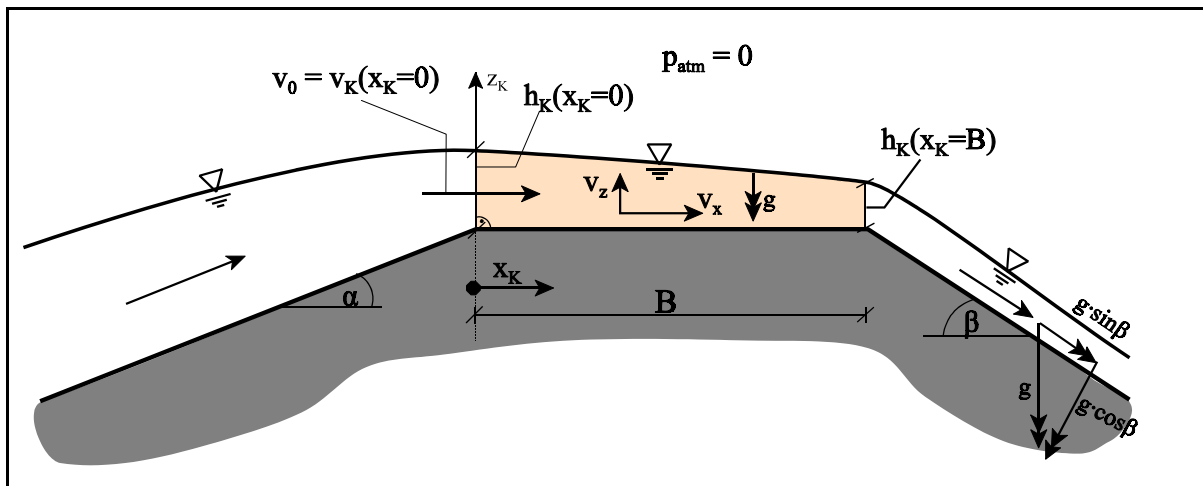
Abb. 4.17: Steigungsmaß  $c_2$  als Funktion der relativen Kronenbreite  $x_K/B$

## 4.4.2 Geschwindigkeiten auf der Deichkrone

Im folgenden sollen die Geschwindigkeiten auf der Deichkrone analysiert werden. Dazu wird die Variation der Überlaufgeschwindigkeiten über der Deichkrone zuerst aufgrund einer vereinfachten Navier-Stokes-Gleichung hergeleitet. Das Ergebnis wird anschließend anhand der Meßergebnisse verifiziert.

### 4.4.2.1 Theoretische Herleitung

Die Herleitung wird auf Grundlage der allgemeinen zweidimensionalen Kontinuitäts- und Bewegungsgleichung einer inkompressiblen Strömung ( $\rho_w = \text{konst.}$ ) durchgeführt ( $x_K$ =böschungsparelle Koordinate;  $z_K$ =böschungsnormale Koordinate). Die verwendeten Bezeichnungen sind in Abb. 4.18 definiert. Auf den Index K zur Definition der Parameter auf der Deichkrone wird aus Gründen der Übersichtlichkeit bei der Herleitung verzichtet.



**Abb. 4.18:** Definitionen für theoretische Herleitung der Strömungsgrößen auf der Deichkrone

*Kontinuitätsgleichung:*

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4.26)$$

*Bewegungsgleichung:*

in x-Richtung:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = g \sin \beta - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] \quad (4.27)$$

in z-Richtung:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} = -g \cos \beta - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} \right] \quad (4.28)$$

Da es sich beim Wellenüberlauf um eine überwiegend böschungsparallele Bewegung handelt, kann der böschungsnormale Anteil vernachlässigt werden ( $v_z \approx 0$ ). Da deshalb im folgenden nur noch Geschwindigkeiten in böschungsparalleler Richtung betrachtet werden, wird auf einen Index zur Angabe der Richtung verzichtet ( $v = v_x$ )

Da der Atmosphärendruck ( $\partial p / \partial x = 0$ ) entlang der Wasseroberfläche konstant ist, kann der Druckterm ebenfalls vernachlässigt werden. Damit folgt Gl. (4.27) zu:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \beta + v \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (4.29)$$

Wird nun vereinfachend von einer laminaren Strömung ausgegangen (auch wenn diese korrekterweise nicht vorliegt), so ist der viskose Reibungsanteil in x-Richtung vernachlässigbar gegenüber dem viskosen Reibungsanteil in z-Richtung:

$$v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \ll v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (4.30)$$

und somit folgt:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \beta + v \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (4.31)$$

Wird Gl. (4.31) über die Wassertiefe (von  $z=0$  bis  $z=h$ ) integriert, so folgt:

$$\int_0^h \frac{\partial v}{\partial t} dz + \int_0^h v \frac{\partial v}{\partial x} dz = \int_0^h g \sin \beta dz + \int_0^h v \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] dz \quad (4.32)$$

$$\Rightarrow h \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{z=h} + h v \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=h} = h g \sin \beta - v \left[ \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=0} \quad (4.33)$$

wobei folgende Annahmen getroffen werden:

$$v \left[ \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=h} \ll v \left[ \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=0} \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{z=0} = 0 \quad \text{und} \quad v \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=0} = 0 \quad (4.35)$$



Gl. (4.34) berücksichtigt, daß der vertikale Geschwindigkeitsgradient ( $\partial v / \partial z$ ) in der Grenzschichtströmung aufgrund der Haftbedingung mit  $v=0$  an der Sohle viel größer als der Geschwindigkeitsgradient außerhalb der Grenzschichtströmung mit einer näherungsweise konstanten Geschwindigkeitsverteilung ist. Aufgrund der Haftbedingung an der undurchlässigen Sohle können die beiden Terme in Gl. (4.35) ebenfalls vernachlässigt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden nur horizontale Deichkronen berücksichtigt. Daher kann der Term ( $h \cdot g \cdot \sin \beta$ ) ebenfalls vernachlässigt werden. Es folgt:

$$h \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{z=h} + h v \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=h} = -v \left[ \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=0} \quad (4.36)$$

Weiterhin wird noch der viskose Anteil durch die allgemeine Gleichung für die Sohlschubspannung  $\tau_0$  ( $\tau_0 = 0,5 \cdot \rho_w \cdot f \cdot v^2$ ) ersetzt:

$$\frac{v}{h} \left[ \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{\tau_0}{h \rho_w} = \frac{f v^2}{2 h}$$

mit  $f$  = Reibungsbeiwert

Damit folgt die Bewegungsgleichung zu:

$$\frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{z=h} + v \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=h} = -\frac{1}{2} \frac{f}{h} v |v| \quad (4.37)$$

Für die Beschreibung der Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichkrone ist die örtliche Änderung dieser Geschwindigkeiten maßgebend. Es soll wie bereits für die Deichaußenböschung die Geschwindigkeit der Überlaufzunge betrachtet werden. Daher kann die lokale Beschleunigung ( $\partial v / \partial t$ ) gegenüber der konvektiven Beschleunigung ( $v \partial v / \partial x$ ) vernachlässigt werden. Damit vereinfacht sich Gl. (4.37) zu:

$$v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{2} \frac{f}{h} v |v| \quad (4.38)$$

Die partiellen Differentiale können durch die totalen Differentiale ersetzt werden, da die Geschwindigkeit  $v$  nur noch eine Funktion von  $x$  ist:

$$\partial v \approx dv \text{ und } \partial x \approx dx$$

Wird Gl. (4.38) mit  $dx$  multipliziert, anschließend eine Trennung der Variablen durchgeführt und die entstehende Gleichung integriert, so folgt:

$$\int_{v_0}^v \frac{2 h}{f v} dv = - \int_0^x dx \quad (4.39)$$

mit  $x = 0$  am Beginn der Deichkrone

$v_0$  = Überlaufgeschwindigkeit am Beginn der Deichkrone =  $v_K(x_K=0)$

Die Integration ergibt:

$$\frac{2}{f} \frac{h}{h} (\ln v - \ln v_0) = -x \quad (4.40)$$

Wird Gl. (4.40) nach  $v$  aufgelöst, so folgt:

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{x f}{2 h}\right) \quad (4.41)$$

wobei  $v_0$  nach Gl. (4.21) bestimmt wird.

Gl. (4.41) ist in Abb. 4.19 in Abhängigkeit der Schichtdicke  $h_k(x_k=0)$  am Beginn der Deichkrone und des Reibungsbeiwertes  $f$  dargestellt. Der Reibungsbeiwert  $f$  muß empirisch für bestimmt werden. Anhaltswerte können dem Schrifttum entnommen werden (*Van Gent*, 1995; *Cornett u. Mansard*, 1994).

#### **4.4.2.2 Einfluß von Schichtdicke und Reibungsbeiwert auf die Geschwindigkeiten auf der Deichkrone**

Der Reibungsbeiwert  $f$  wurde für die Variation der Schichtdicken konstant zu  $f=0,0058$  angesetzt (s. Bestimmung des Reibungsbeiwertes für die untersuchte Deichböschung in Abschnitt 4.5.2.3). Es wird deutlich, wie der Einfluß der Reibung auf die Überlaufgeschwindigkeiten mit zunehmender Schichtdicke geringer wird und bereits ab einer Schichtdicke von 5cm die Reduktion der Überlaufgeschwindigkeit nur noch 2% beträgt. Die kleineren Schichtdicken in Abb. 4.19 ( $h_k \leq 2,0\text{cm}$ ) sind für die weitere Auswertung weniger relevant, da Maßstabseffekte die Überlaufströmung in diesem Bereich stark beeinflussen (s. Abschnitt 3.1).

Für die Bestimmung des Einflusses des Reibungsbeiwertes auf die Überlaufgeschwindigkeiten wurde beispielhaft eine Schichtdicke von 5,0cm am Beginn der Deichkrone angesetzt. Der Reibungsbeiwert  $f$  wurde zwischen  $f=0,0058$  (s. Abschnitt 4.5.2.3 für die untersuchte Deichböschung);  $f=0,02$  (*Van Gent*, 1995 für glatte Böschungen);  $f=0,10$  und  $f=0,60$  (*Cornett u. Mansard*, 1994 für raue Deckwerke) variiert. Der starke Einfluß des Reibungsbeiwertes auf die Überlaufgeschwindigkeiten ist offensichtlich (Abb. 4.19)

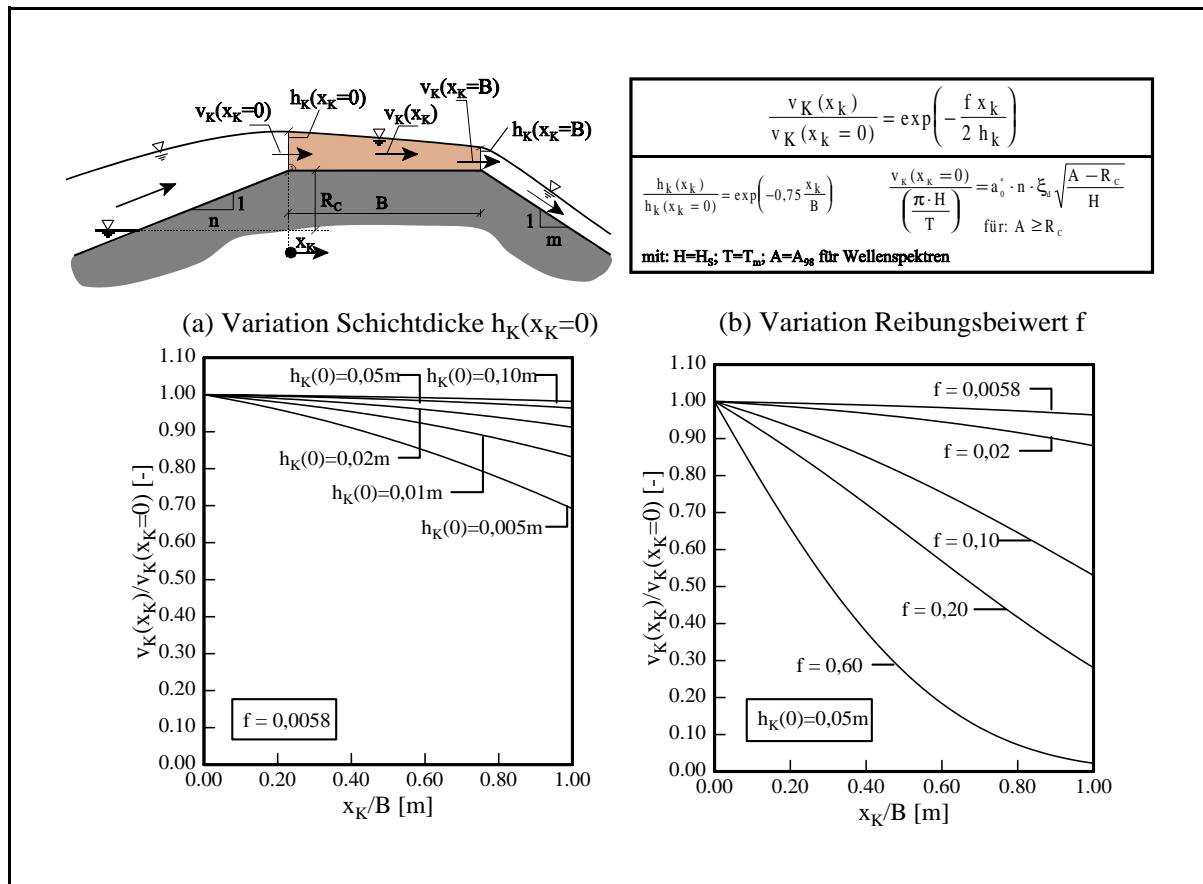


Abb. 4.19: Einfluß der Schichtdicke und des Reibungsbeiwertes auf die Überlaufgeschwindigkeit auf der Deichkrone

#### 4.4.2.3 Experimentelle Ergebnisse zu den Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichkrone

Die Geschwindigkeit des Überlaufschwells stellt die maximale Strömungsbelastung der Deichkrone dar und kann anhand von Gl. (4.21) für den Beginn der Deichkrone ermittelt werden:

$$\frac{v_K(x_K=0)}{\left(\frac{\pi H}{T}\right)} = 0,75 n \xi_d \sqrt{\frac{A - R_C}{H}} \quad \text{für } A > R_C$$

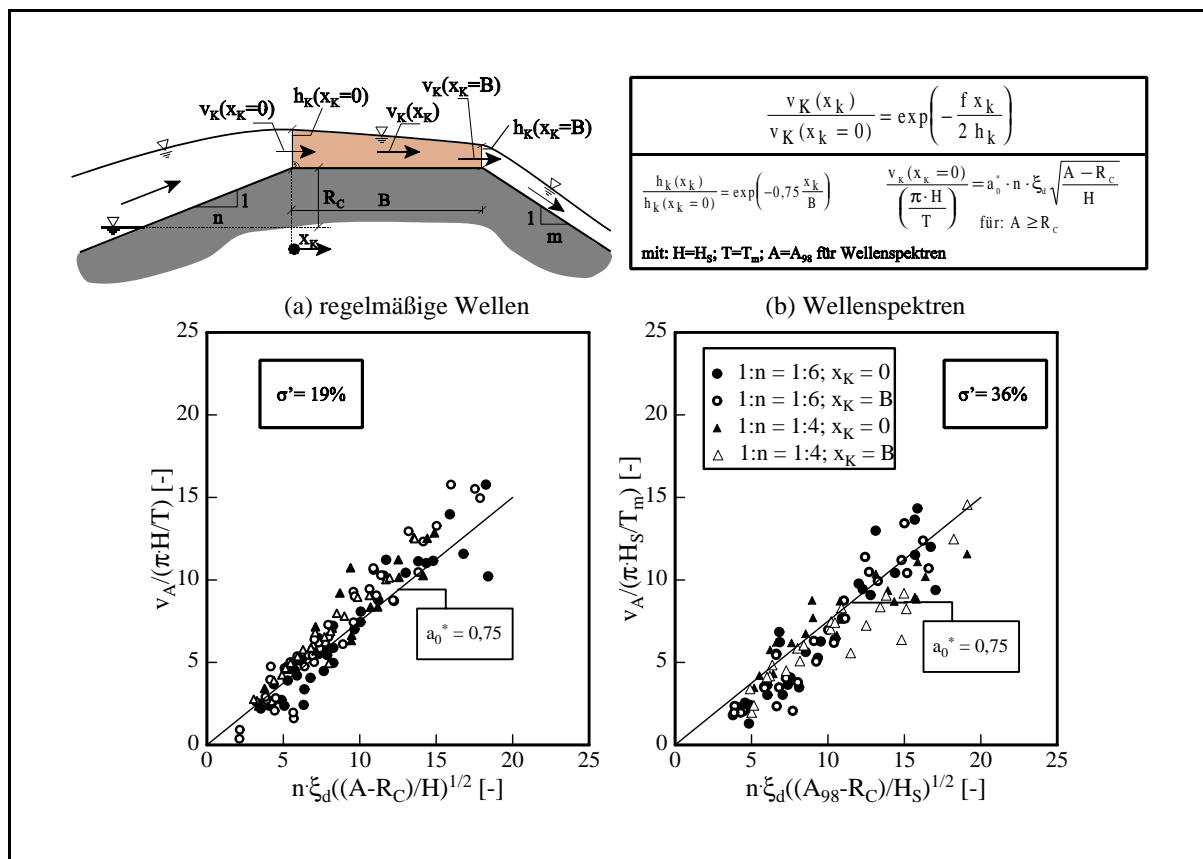
Die Überlaufgeschwindigkeit auf der Deichkrone wird nur durch Bodenreibung beeinflusst. Der Reibungsbeiwert für die untersuchte Deichböschung wurde zu  $f=0,0058$  ermittelt (s. Abschnitt 4.5.2.3). Da die untersuchte Deichkrone mit  $B=0,30\text{m}$  relativ kurz ist und die Deichoberfläche im Modell sehr glatt ausgebildet wurde, kann davon ausgegangen werden, daß in diesen Modelluntersuchungen die Überlaufgeschwindigkeit keinen großen Veränderungen entlang der Deichkrone ausgesetzt ist. Abb. 4.19 zeigt, daß sich die Überlaufgeschwindigkeit auf der Deichkrone bei einem Reibungsbeiwert von  $f=0,0058$  im Bereich der experimentell untersuch-

ten Schichtdicken zwischen 2cm und 10cm theoretisch nur zwischen ca. 1% ÷ 8% reduziert. Dies bedeutet, daß die Überlaufgeschwindigkeit am Beginn der Deichkrone ( $v_K(x_K=0)$ ) nahezu gleich der Überlaufgeschwindigkeit am Ende der Deichkrone ist ( $v_K(x_K=B)$ ).

Abb. 4.20 zeigt einen Vergleich der Überlaufgeschwindigkeiten am Beginn und am Ende der Deichkrone für den 1:4 und den 1:6 Deich für *regelmäßige Wellen* (Abb. 4.20a) und *Wellenspektren* (Abb. 4.20b). Hier zeigt sich, daß die Änderung der Überlaufgeschwindigkeit vom Beginn zum Ende der Deichkrone minimal ist und die theoretischen Abweichungen unterhalb der Meßgenauigkeit liegen.

Damit kann näherungsweise von folgender Annahme ausgegangen werden:

$$v_K(x_K=0) \cong v_K(x_K=B) \quad (4.42)$$



**Abb. 4.20:** Vergleich der Überlaufgeschwindigkeiten am Beginn und am Ende der Deichkrone

#### 4.4.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Ziel der Bestimmung des Strömungsfeldes auf der Deichkrone ist die Ermittlung der Eingangsparameter für das Strömungsfeld auf der Deichbinnenböschung aus den Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung.

Für die Bestimmung der **Überlaufgeschwindigkeiten** auf der Deichkrone wurde eine theoretische Näherungslösung aus der Navier-Stokesschen Gleichung abgeleitet.

$$v_k = v_k(x_k=0) \exp\left(-\frac{x_k f}{2 h_k}\right)$$

Es wurde theoretisch gezeigt, daß sich die Überlaufgeschwindigkeiten vom Anfang zum Ende der Deichkrone im Bereich der untersuchten Schichtdicken im Modell (Reibungsbeiwert  $f=0,0058$ ) in der Größenordnung von weniger als 2% ändern. Bei einem Variationskoeffizienten von  $\sigma' = 20\%$  verlieren sich diese Änderungen in den Streuungen. Daher kann für die untersuchte glatte Deichböschung die Überlaufgeschwindigkeit am Ende der Deichkrone ( $v_k(B)$ ) der Überlaufgeschwindigkeit am Anfang der Deichkrone ( $v_k(0)$ ) gleichgesetzt werden.

Für die Berechnung der **Schichtdicken** wurde eine einfache empirische Näherungsgleichung bestimmt:

$$\frac{h_k(x_k)}{h_k(x_k=0)} = \frac{c_2(x_k)}{c_2(x_k=0)} = \exp\left(-0,75 \frac{x_k}{B}\right)$$

mit:  $\sigma' = 6,6\%$

Der theoretische Ansatz für die Überlaufgeschwindigkeiten sowie der empirische Ansatz für die Bestimmung der Schichtdicken konnten sowohl für *Wellenspektren* als auch für *regelmäßige Wellen* verifiziert werden. Dies bedeutet, daß die Prozesse auf Deichkrone und Deichbinnenböschung unabhängig vom Wellentyp sind. Der Wellentyp ist nur für die Bestimmung der Eingangsparameter am Beginn der Deichkrone ( $x_k=0$ ) relevant.

##### Anmerkungen zum Ergebnis:

*Während das Ergebnis zu den Schichtdicken eine deutliche Abnahme vom Beginn der Deichkrone zum Ende der Deichkrone zeigt, ändern sich die Überlaufgeschwindigkeiten auf gleicher Strecke nahezu nicht. Dieser Aspekt „scheint“ der Kontinuitätsgleichung zu widersprechen.*

*Die Kontinuitätsgleichung ist natürlich weiterhin gültig. Im folgenden sollen daher kurz die Gründe für die scheinbare Diskontinuität betrachtet werden.*

*Auf der Deichkrone löst sich der Überlaufschwall aus dem Auflaufschwall. Die überlaufende Wassermasse dispersiert auf der Deichkrone. Betrachtet man nun wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur die Überlaufrfront, d.h. die Spitze der Überlaufzunge, so wird diese immer dünner und verliert zusätzlich an Geschwindigkeit. Zahlreiche Analogien aus dem Wasserbau belegen diese Erscheinung (z.B. Front der Dammbruchwelle). Zusätzlich läuft Wasser von der Deichkrone auf der Deichaußenböschung ab, was ebenfalls zu einer Differenz in der Wasserbilanz zwischen Kronenanfang und Kronenende führt.*

Daher sind klein- und großmaßstäbliche Untersuchungen erforderlich, um die Prozesse auf der Deichkrone unter Berücksichtigung der erwähnten Anmerkungen weitergehend zu untersuchen und beide Ansätze (Schichtdicken, Überlaufgeschwindigkeiten) auch für andere Böschungsrauheiten und größere Kronenbreiten zu verifizieren. Dies gilt auch hinsichtlich der Annahmen für die theoretische Gleichung (konstante Strömungsverteilung über die Wassertiefe, hydrostatische Druckverteilung).

Ferner ist die räumliche Ausdehnung des Wellenüberlaufs anhand von Modellversuchen im Wellenbecken zu klären. Aufnahmen von Wellenüberlaufereignissen in der Natur zeigen (Abb. 1.2), daß Wellenüberlauf infolge der Kurzkämmigkeit des Seegangs lokal begrenzt ist, während im Rahmen dieser Untersuchungen von einer Deichkrone ausgegangen wird, die in Deichlängsrichtung konstant überströmt wird (langkämmiger Seegang für Wellenangriffsrichtung  $\theta=0^\circ$ ).

## 4.5 Strömungsfeld auf der Deichbinnenböschung

Das überlaufende Wasser fließt von der Deichkrone auf die Deichbinnenböschung. Wie bereits in Abschnitt 1 gezeigt wurde, werden schwere Schäden an Deichen häufig durch überlaufendes Wasser von der Binnenböschung her verursacht (Abb. 1.2 und 1.3). Daher stellt die Beschreibung des Strömungsverhaltens auf der Deichbinnenböschung einen wichtigen Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

Zuerst wird jedoch die mittlere Wellenüberlaufrate als integraler Parameter aus Schichtdicke und Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Die mittlere Wellenüberlaufrate dient einerseits zur Überprüfung der Kontinuität und ist andererseits eine wichtige Bemessungsgröße für die Binnenentwässerung hinter Überlaufdeichen.

Anschließend werden die maßgebenden Strömungsgrößen auf der Deichbinnenböschung untersucht. Der Überlaufschwall wird hier infolge Gravitation beschleunigt. Dies führt zu einer Abnahme der Schichtdicken und einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in Fließrichtung. Der Beschleunigung infolge Gravitation wirken innere (Turbulenz) und äußere (Sohlleibung) Reibung entgegen.

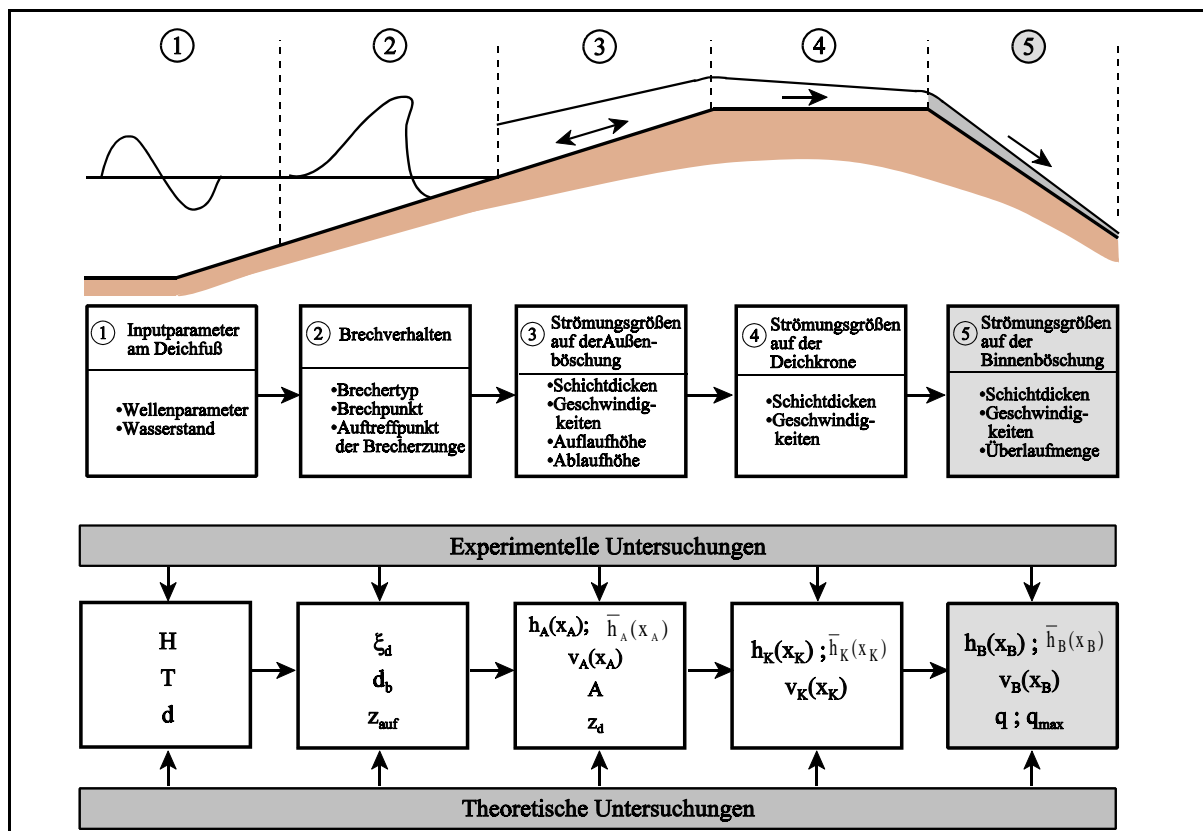


Abb. 4.21: Darstellung der Prozesse auf der Deichbinnenböschung im Zusammenhang mit den Prozessen des Wellenüberlaufes

#### 4.5.1 Neue Ansätze für mittlere Wellenüberlauraten

Bevor im nächsten Abschnitt auf die lokalen physikalischen Prozesse beim Wellenüberlaufvorgang detailliert eingegangen wird, soll hier die mittlere Wellenüberlaurate  $q$  als zusammenfassende globale Größe aus Schichtdicke  $h(t)$  und Überlaufgeschwindigkeit  $v(t)$  betrachtet werden. Die mittlere Wellenüberlaurate  $q$  stellt die bislang am meisten untersuchte Überlaufgröße dar und kann somit für Vergleichszwecke herangezogen werden. In Abschnitt 2.4 wurden die Verfahren zur Ermittlung der mittleren Wellenüberlaurate  $q$  dargestellt und in Tab. 2.4 Möglichkeiten zur Bildung dimensionsloser Parameter aufgezeigt. Um für den Wellenüberlauf sinnvolle dimensionslose Überlaufparameter ( $Q_*$ ,  $Q_0$ ,  $R_*$ ,  $b$ ) zu verwenden, wird im folgenden ein neuer Berechnungsansatz auf Grundlage der physikalischen Randbedingungen entwickelt. Dazu wird zuerst der Wellenüberlauf ohne Freibord ( $R_C=0$ ) untersucht. Anschließend werden mittlere und maximale Wellenüberlaurate verglichen. Die maximale Wellenüberlaurate ist in diesem Zusammenhang als Überlaurate der Überlaufront definiert.

##### (a) Wellenüberlauf ohne Freibord ( $R_C=0$ )

Der Wellenüberlauf kann in erster Näherung durch die einfache Wehrformel (Gl. 2.9) beschrieben werden, wobei die Überfallhöhe  $h_u$  durch die Wellenhöhe  $H$  ersetzt wird:

$$q(R_C=0) = \frac{2}{3} k_u \sqrt{2 g H^3} \quad (4.43)$$

mit:  $k_u$  = Überfallbeiwert für Wellenüberlauf =  $f(\text{Deichneigung } \tan\alpha, \text{ Wellensteilheit } H/L)$

Da die Wellensteilheit  $H/L$  und die Deichneigung  $\tan\alpha$  zur Brecherkennzahl  $\xi_d$  zusammengefaßt werden können, folgt Gl. (4.43) in dimensionsloser Schreibweise zu:

$$Q_0 = \frac{q(R_C=0)}{\sqrt{2 g H^3}} = \frac{2}{3} k_u = f(H/L, \tan\alpha) = f(\xi_d) = c_4 \cdot \xi_d \quad (4.44)$$

Gl. (4.44) ist in Abb. 4.22 zusammen mit den Meßergebnissen für  $R_C=0$  dargestellt. Für die *regelmäßigen Wellen* konnte die folgende Gleichung für die Berechnung der mittleren Wellenüberlaurate  $q$  für  $R_C=0$  ermittelt werden ( $r^2=0,91$ ;  $\sigma'=11\%$ ):

$$\begin{aligned} Q_0 &= 0,063 \cdot \xi_d & \text{für } \xi_d < 2,0 \\ Q_0 &= 0,168 - \frac{0,336}{\xi_d^3} & \text{für } \xi_d \geq 2,0 \end{aligned} \quad (4.45)$$



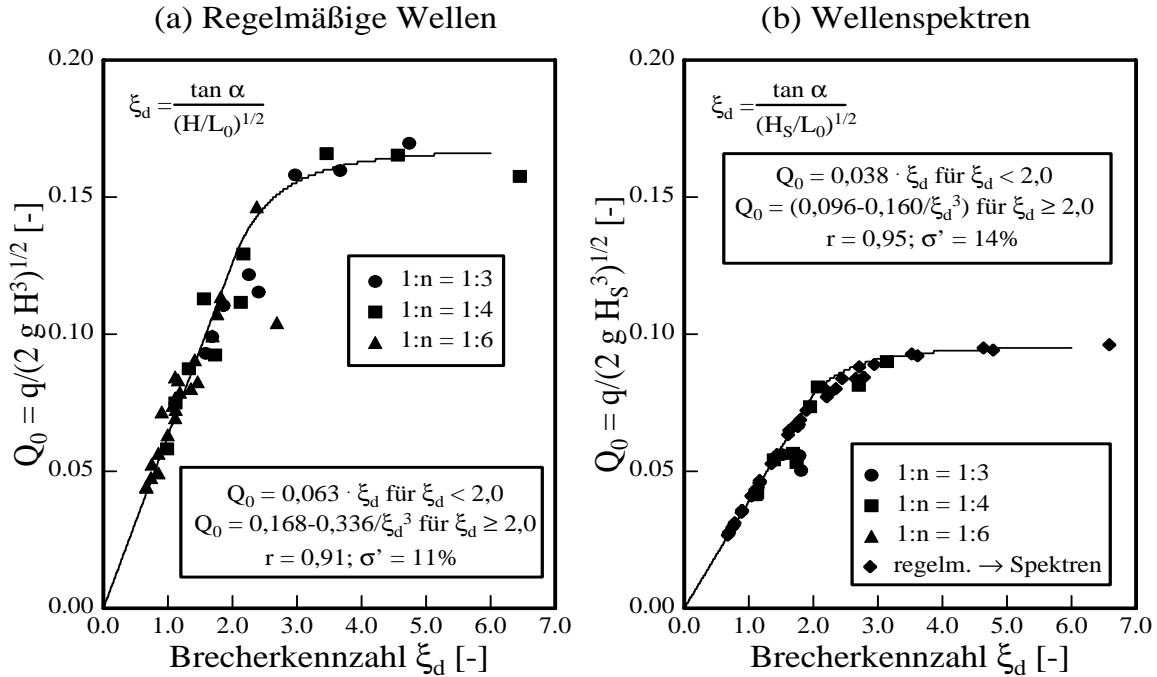


Abb. 4.22: Dimensionslose mittlere Wellenüberlaufrate  $Q_0$  für *regelmäßige Wellen* und *Wellenspektren* bei einer Freibordhöhe  $R_C=0$

$Q_0$  zeigt eine lineare Abhängigkeit von der Brecherkennzahl  $\xi_d$  für Sturzbrecher und den erwarteten Konstanzbereich für Reflexionsbrecher (s. Tab. 2.1). Die Funktion  $Q_0=f(\xi_d)$  wurde als stetige und differenzierbare Funktion für Sturz- und Reflexionsbrecher ermittelt.

Da für *Wellenspektren* nur wenige Daten für  $R_C=0$  zur Verfügung standen, wurden weitere Daten auf Grundlage der *regelmäßigen Wellen* generiert. Für jeden Versuch mit *regelmäßigen Wellen* wurde unter der Annahme einer Rayleigh-Verteilung für die Wellenhöhen und eines Zufallsgenerators für die Abfolge der einzelnen Wellen ein Wellenzug mit der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  und der mittleren Wellenperiode  $T_m$  künstlich generiert. Für jede einzelne Welle mit den Wellenparametern  $H_i$  und  $T_i$  wurde dann die Wellenüberlaufrate  $q_i$  auf der Grundlage von Gl. (4.45) ermittelt und anschließend die mittlere Wellenüberlaufrate  $q$  für den künstlich generierten Wellenzug berechnet:

$$q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i(H, T) \quad (4.46)$$

mit:  $N$  = Anzahl der Wellen  
 $q_i$  = Wellenüberlaufrate einer einzelnen Welle mit der Wellenhöhe  $H_i$  und der Wellenperiode  $T_i$   
 $q$  = mittlere Wellenüberlaufrate

Abb. 4.22b zeigt einen Vergleich der Wellenüberlaufzeiten für künstlich generierte *Wellenspektren* und gemessene *Wellenspektren* für  $R_C=0$ . Auf dieser Grundlage wurde die folgende Funktion zur Ermittlung der mittleren Wellenüberlaufzeit für  $R_C=0$  hergeleitet:

$$\begin{aligned} Q_0 &= 0,038 \cdot \xi_d & \text{für } \xi_d < 2,0 \\ Q_0 &= 0,096 - \frac{0,160}{\xi_d^3} & \text{für } \xi_d \geq 2,0 \end{aligned} \quad (4.47)$$

mit:  $r=0,95$ ;  $\sigma'=14\%$  (Ermittlung der statistischen Parameter nur für gemessene Wellenüberlaufzeiten!)

Der Unterschied in den Gl. (4.45) und (4.47) ist auf die Wahl der maßgebenden Wellenparameter zurückzuführen. Als charakteristische Wellenhöhe für *Wellenspektren* wurde  $H_s$  verwendet, während die Wellenhöhe  $H$  für *regelm. Wellen* einer mittleren Wellenhöhe entspricht. Die Unterschiede zeigen sich im  $Q_0$ -Wert.

#### (b) Wellenüberlauf mit Freibord ( $R_C > 0$ )

Neben der Randbedingung  $R_C=0$  wird als zweite Randbedingung für die Definition der Überlaufzeitfunktion:

$$R_C = A_{98}$$

berücksichtigt. Damit folgt die relative Freibordhöhe  $R_*$  zu:

$$R_* = \frac{R_C}{A_{98}} \quad (4.48),$$

wobei die Auflaufhöhe  $A_{98}$  hier nach Gl. (4.6) bestimmt wird. Unter Anwendung eines exponentiellen Überlaufmodells folgt dann:

$$Q_* = Q_0 \cdot \exp(-b \cdot R_*) \quad (4.49)$$

für alle Freibordhöhen  $0 \leq R_C \leq A_{98}$ .

Da die Wellenaufbauhöhe  $A_{98}$  berücksichtigt wird, kann die mittlere Wellenüberlaufzeit  $q$  direkt für  $R_C=A_{98}$  bestimmt werden:

$$Q_* = Q_0 \cdot \exp(-b) \quad (4.50)$$

Der Koeffizient  $b$  wurde experimentell aus den Modellversuchen ermittelt (Abb. 4.23):

$$b = 5,50 \text{ für } \textit{Wellenspektren} (\sigma'=23\%)$$

Die vollständige Gleichung zur Ermittlung der Wellenüberlaufzeit  $q$  ergibt sich damit zu:

$$\frac{q}{\sqrt{2gH_S^3}} = 0,038 \xi_d \exp\left(-5,5 \frac{R_C}{A_{98}}\right) \quad \text{für } \xi_d < 2,0 \quad (4.51.a)$$

$$\frac{q}{\sqrt{2gH_S^3}} = \left(0,096 - \frac{0,160}{\xi_d^3}\right) \cdot \exp\left(-5,5 \frac{R_C}{A_{98}}\right) \quad \text{für } \xi_d \geq 2,0 \quad (4.51.b)$$

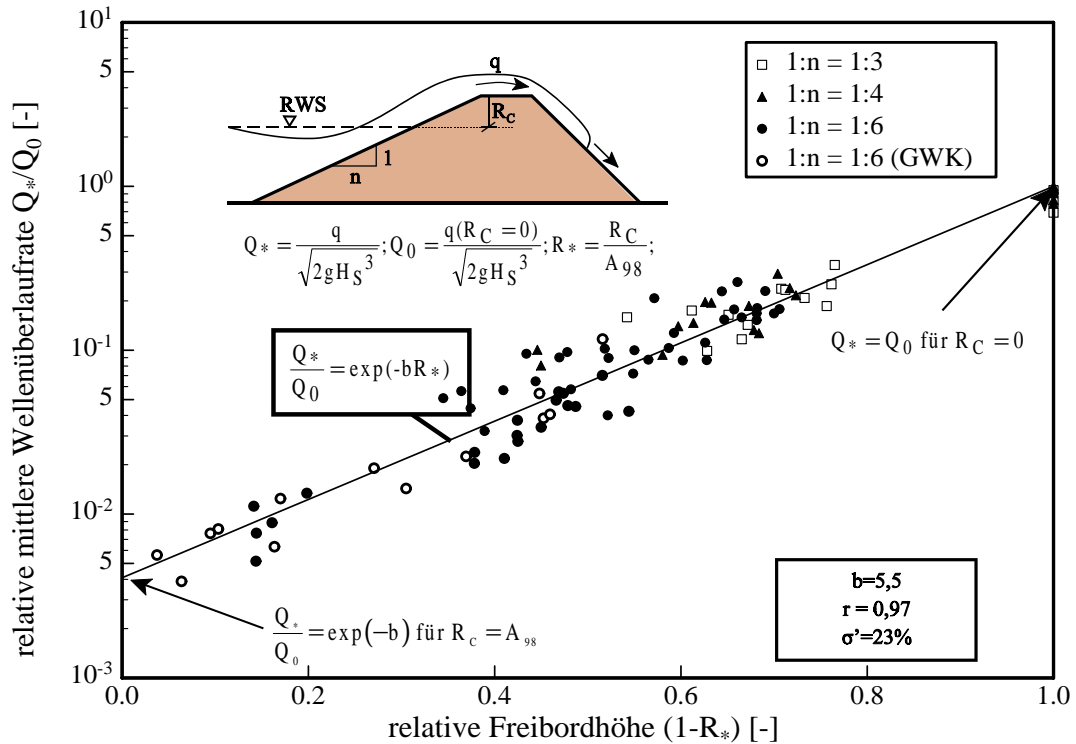


Abb. 4.23: Darstellung der gemessenen mittleren Wellenüberlaufaten  $q$  für Wellenspektren

Zur Bestimmung von Gl. (4.51) wurden zusätzlich gemessene Wellenüberlaufaten weiterer klein- und großmaßstäblicher Modellversuche berücksichtigt (Oumeraci et al., 2000a,b). Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Gültigkeit von Gl. (4.51) für große Freibordhöhen und ohne den Einfluß von Maßstabseffekten zu verifizieren.

Für *regelmäßige Wellen* besitzt ein exponentielles Überlaufmodell der Form  $Q_* = Q_0 \cdot \exp(-b \cdot R_*)$  keine Bedeutung, da die Wellenüberlaufate  $q$  für eine Freibordhöhe  $R_C$ , die der Wellenaufbauhöhe  $A$  entspricht, gleich Null ist ( $q(R_C=A)=0$ ). Für *Wellenspektren* führen dagegen 2% aller Wellen zum Wellenüberlauf ( $q(R_C=A_{98}) > 0$ ). Daher eignet sich für *regelmäßige Wellen* eine dimensionslose Gleichung der Form  $Q_* = Q_0 \cdot (1-R_*)^b$  besser zur Beschreibung der mittleren Wellenüberlaufaten. Der Koeffizient  $b$  wurde aus den Versuchsdaten zu:

$$b = 2,30 \text{ für } \textit{regelmäßige Wellen} \quad (\sigma' = 23\%)$$

bestimmt.

Auf diese Weise folgt die vollständige Gleichung zur Ermittlung mittlerer Wellenüberlaufzeiten für *regelmäßige Wellen* zu:

$$\frac{q}{\sqrt{2g} H^3} = 0,063 \xi_d \left( 1 - \frac{R_C}{A} \right)^{2,3} \quad \text{für } \xi_d < 2,0 \quad (4.52a)$$

$$\frac{q}{\sqrt{2g} H^3} = \left( 0,168 - \frac{0,336}{\xi_d^3} \right) \cdot \left( 1 - \frac{R_C}{A} \right)^{2,3} \quad \text{für } \xi_d \geq 2,0 \quad (4.52b)$$

Damit berücksichtigen die Gl. (4.51) für *Wellenspektren* und Gl. (4.52) für *regelmäßige Wellen* beide Randbedingungen ( $q(R_C=0)$ ;  $q(R_C=A_{98})$ ) korrekt. Während die Wellenüberlaufzeit für *regelm. Wellen* durch die Auflaufhöhe  $A$  begrenzt ist ( $q(R_C=A)=0$  in Abb. 4.24), laufen 2% aller ankommenden Wellen für *Wellenspektren* über den Deich ( $q(R_C=A_{98})>0$  in Abb.4.23). Eine Erweiterung des Verfahrens für Wellenüberlaufzeiten bei sehr großen Freibordhöhen ( $R_C \geq A_{98}$ ) ist erforderlich. Entsprechende Versuche wurden aufgrund der Zielsetzung der Arbeit nicht durchgeführt, da eine Messung des Strömungsfeldes bei sehr kleinen Wellenüberlaufzeiten im kleinen Wellenkanal nicht möglich war.

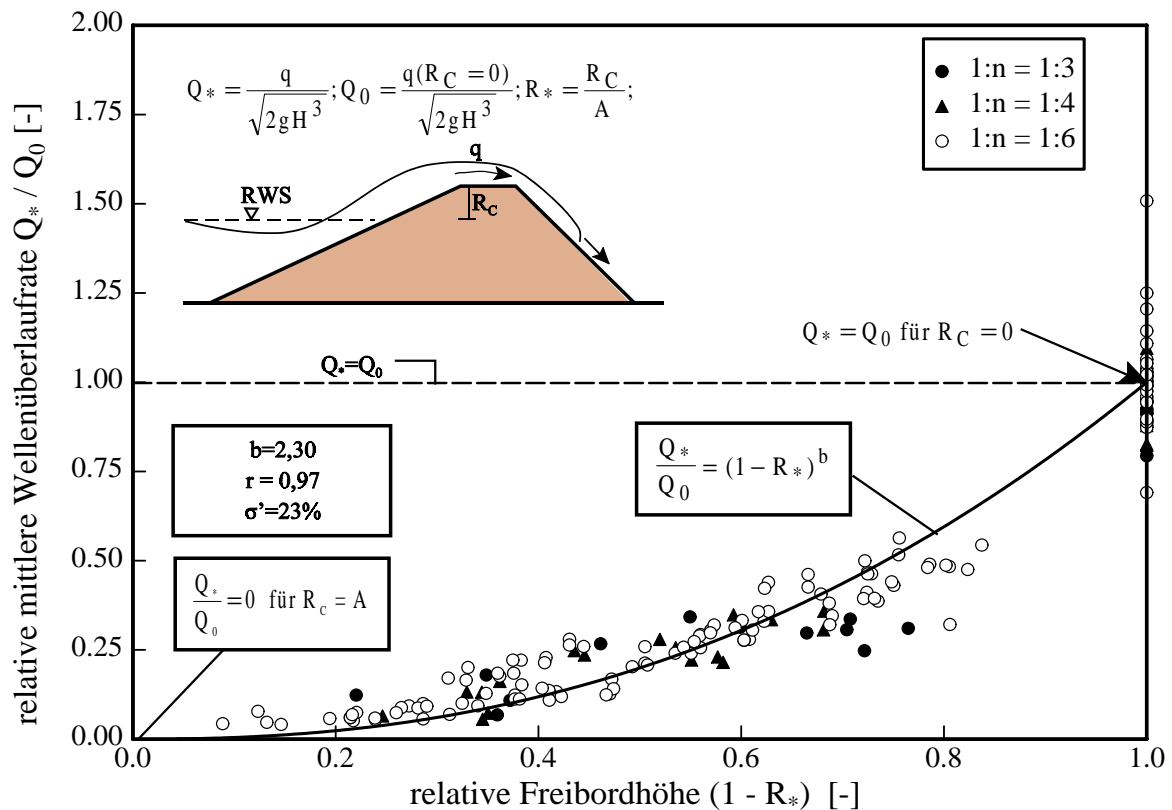


Abb. 4.24: Darstellung der gemessenen mittleren Wellenüberlaufzeiten  $q$  für *regelmäßige Wellen*

### (c) Vergleich mittlerer Wellenüberlauraten mit maximalen Wellenüberlauraten

Im folgenden soll ein Vergleich der mittleren Wellenüberlauraten  $q$  mit den Wellenüberlauraten durchgeführt werden, die auf Grundlage der Ansätze für Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten berechnet werden können und im weiteren als maximale Wellenüberlauraten  $q_{\max}$  bezeichnet werden. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung von  $q_{\max}$  wurde bereits in Abb. 3.12 dargestellt.

Die maximale Wellenüberlaurate  $q_{\max}$  folgt aus:

$$q_{\max} = v_K(x_K=B) \cdot h_K(x_K=B) \quad (4.53),$$

mit:  $h_K$  = mittlere Schichtdicke am Ende der Deichkrone  
 $v_K$  = Überlaufgeschwindigkeit am Ende der Deichkrone

Die Überlaufgeschwindigkeit  $v_K(x_K=B)$  kann anhand der Gl. (4.21) und Gl. (4.41) ermittelt werden. Die mittlere Schichtdicke berechnet sich aus den Gl. (4.11) bzw. (4.14) und Gl. (4.24). Damit folgt  $q_{\max}$  allgemein zu:

$$q_{\max} = c_2^* \cdot a_0^* \cdot c_1^{1,5} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \exp\left(-0,75 \frac{x_K}{B}\right) \cdot \frac{\sqrt{\xi_d}}{2} \cdot \left(1 - \frac{R_C}{A}\right)^{1,5} \quad (4.54)$$

Wird nun das Verhältnis aus maximaler Überlaurate  $q_{\max}$  zu mittlerer Wellenüberlaurate  $q$  bestimmt, so folgt für *regelmäßige Wellen* ( $x_K=B$ )<sup>4.2.)</sup>:

$$\frac{q_{\max}}{q} = \frac{c_2^* a_0^* c_1^{1,5} \sqrt{\pi} 0,47 \sqrt{\xi_d}}{2 c_4} \left(1 - \frac{R_C}{A}\right)^{-0,8} = 1,41 \sqrt{\xi_d} \left(1 - \frac{R_C}{A}\right)^{-0,8} \quad (4.55a)$$

und für *Wellenspektren*:

$$\frac{q_{\max}}{q} = \frac{c_2^* a_0^* c_1^{1,5} \sqrt{\pi} 0,47 \sqrt{\xi_d}}{2 c_4} \frac{\left(1 - \frac{R_C}{A_{98}}\right)^{1,5}}{\exp\left(-5,5 \frac{R_C}{A_{98}}\right)} = 2,54 \sqrt{\xi_d} \frac{\left(1 - \frac{R_C}{A_{98}}\right)^{1,5}}{\exp\left(-5,5 \frac{R_C}{A_{98}}\right)} \quad (4.55b)$$

Die Gl. (4.55a) und (4.55b) sind in Abb. 4.25 zusammen mit dem Verhältnis aus gemessener maximaler Wellenüberlaurate  $q_{\max}$  zu mittlerer Wellenüberlaurate  $q$  dargestellt. Hier zeigt sich eine gute Anpassung an die Versuchsdaten im Untersuchungsbereich. Es wird auch deutlich, daß das Verhältnis aus  $q_{\max}/q$  für *Wellenspektren* aufgrund der Verteilung von Wellenhöhen und

4.2.)

Die Ermittlung von  $q_{\max}/q$  wird am Beispiel von Sturzbrechern vorgeführt. Eine Berechnung für Reflexionsbrecher kann analog zu der hier gewählten Vorgehensweise vorgenommen werden und wird aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht dargestellt, da das Ziel dieses Abschnitts das Aufzeigen der Unterschiede zwischen maximaler und mittlerer Wellenüberlaurate ist.

Wellenperioden im Spektrum wesentlich höher als für *regelmäßige Wellen* ist. Dies macht auch deutlich, wie notwendig eine Bemessung von Seedeichen auf der Grundlage der direkten Strömungsgrößen im Wellenüberlauf ist. Für das Beispiel einer relativen Freibordhöhe  $(1-R_C/A_{98})=0,3$  und einer Brecherkennzahl  $\xi_d=2,0$  folgt  $q_{\max}/q = 28$ . Beträgt die mittlere Wellenüberlaufrate  $q=2,0 \text{ l/(s}\cdot\text{m)}$ , so folgt die maximale Wellenüberlaufrate zu  $q_{\max}=56 \text{ l/(s}\cdot\text{m)}$ . Die Größenordnung der maximalen Wellenüberlaufrate veranschaulicht das Gefährdungspotential eines Deiches besser als die gewählte mittlere Wellenüberlaufrate.

Bei der Diskussion der Gl. (4.55a) und (4.55b) fällt auf, daß  $q_{\max}/q$  für *regelmäßige Wellen* im Bereich der Wellenaufbauhöhe  $A$  gegen unendlich strebt, während das Verhältnis  $q_{\max}/q$  für *Wellenspektren* im Bereich der Wellenaufbauhöhe  $A_{98}$  gegen Null geht. Grund hierfür sind die Ansätze für Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten, die von  $v_K(A)=0$  und  $h_K(A)=0$  für *regelmäßige Wellen* bzw.  $v_K(A_{98})=0$  und  $h_K(A_{98})=0$  für *Wellenspektren* ausgehen. Hier sind weitergehende Untersuchungen von Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten im Bereich der Aufbauhöhe  $A_{98}$  erforderlich. Da eine maximale Aufbauhöhe  $A_{\max}$  statistisch nicht existiert, sind in Zukunft Berechnungsansätze zu ermitteln, für die gilt:  $v_K(A_{98})>0$  und  $h_K(A_{98})>0$ . Aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit wurde dieser Bereich nicht weiter untersucht und stellt somit einen Ansatzpunkt für weitere Detailuntersuchungen dar.

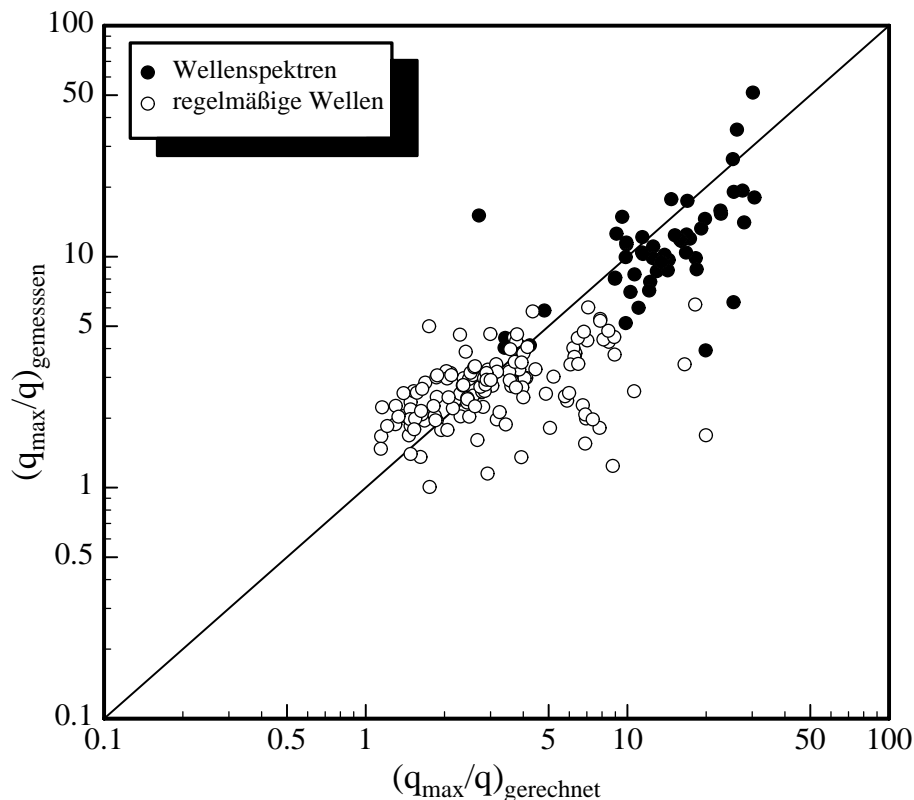


Abb. 4.25: Vergleich mittlere und maximale Wellenüberlaufraten

#### 4.5.2 Theoretische Ansätze für Geschwindigkeit und Schichtdicke des Überlaufschwells auf der Deichbinnenböschung

Für die Beschreibung der Überlaufströmung soll im folgenden eine analytische Lösung aus der allgemeinen Kontinuitäts- und Bewegungsgleichung (Navier-Stokessche bzw. Saint Venantsche Gleichung) hergeleitet werden. Dabei werden die Terme aus der Bewegungsgleichung identifiziert, die für die Herleitung einer analytischen Lösung vernachlässigt werden können.

##### 4.5.2.1 Allgemeine Herleitung

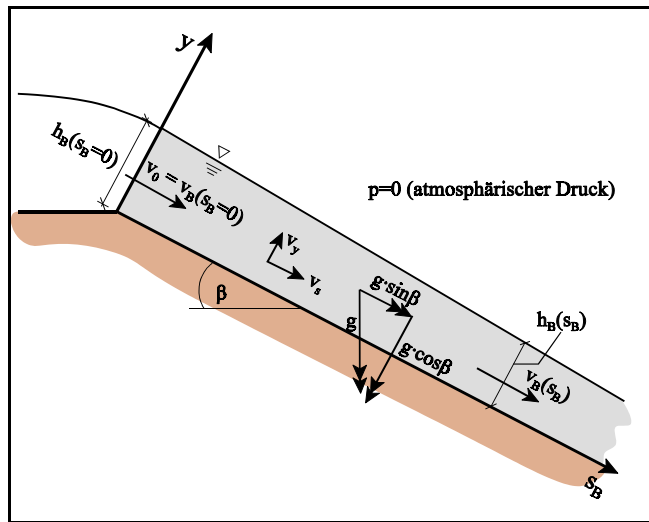


Abb. 4.26: Definitionsskizze für die Deichbinnenböschung

Die Herleitung der theoretischen Näherungslösung wird wie bereits für die Deichkrone auf Grundlage der allgemeinen zweidimensionalen Kontinuitäts- und Bewegungsgleichung einer inkompressiblen Strömung ( $\rho_w = \text{konst.}$ ) durchgeführt ( $s$ =böschungsparallele Koordinate;  $y$ =böschungsnormale Koordinate). Die verwendeten Bezeichnungen können Abb. 4.26 entnommen werden. Auf den Index B zur Definition der Parameter auf der Deichbinnenböschung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit bei der Herleitung verzichtet.

*Kontinuitätsgleichung:*

$$\frac{\partial v_s}{\partial s} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (4.56)$$

*Bewegungsgleichung:*

in s-Richtung:

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial s} + v_y \frac{\partial v_s}{\partial y} = g \sin \beta - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial s} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_s}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 v_s}{\partial y^2} \right] \quad (4.57)$$

in y-Richtung:

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_s \frac{\partial v_y}{\partial s} = -g \cos \beta - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial s^2} \right] \quad (4.58)$$

Es können nun die gleichen Annahmen und Vereinfachungen wie für die Deichkrone durchgeführt werden (s. Abschnitt 4.4.2.1). Allerdings bleibt der Term  $(h \cdot g \cdot \sin\beta)$  erhalten. Damit folgt:

$$\frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{y=h} + v \frac{\partial v}{\partial s} \Big|_{y=h} = g \sin\beta - \frac{f v^2}{2 h} \Big|_{y=h} \quad (4.59)$$

Werden nun die partiellen Differentiale der lokalen und konvektiven Beschleunigung durch das entsprechende totale Differential ersetzt:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \quad (4.60)$$

so gilt:

$$\frac{dv}{dt} = g \sin\beta - \frac{f v^2}{2 h} \quad (4.61)$$

Durch Trennung der Variablen

$$\int_{v_0}^v \frac{dv}{\left( g \sin\beta - \frac{f v^2}{2 h} \right)} = \int_0^t dt \quad (4.62)$$

und Integration folgt:

$$t = -\frac{2}{\sqrt{\frac{4 f}{2 h} g \sin\beta}} \operatorname{artanh} \left( -\frac{\frac{f v}{h}}{\sqrt{\frac{4 f}{2 h} g \sin\beta}} \right) + \frac{2}{\sqrt{\frac{4 f}{2 h} g \sin\beta}} \operatorname{artanh} \left( -\frac{\frac{f v_0}{h}}{\sqrt{\frac{4 f}{2 h} g \sin\beta}} \right)$$

mit:  $v_0$  = Geschwindigkeit am Beginn der Deichbinnenböschung (4.63)

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Wurzelterm durch einen Faktor  $k_1$  ersetzt:

$$k_1 = \sqrt{\frac{2 f g \sin\beta}{h}}$$

Außerdem wird der zweite  $\operatorname{artanh}(\dots)$ -Term durch einen Faktor  $k_2$  ersetzt:

$$k_2 = \operatorname{artanh} \left( -\frac{f v_0}{h k_1} \right)$$

Damit vereinfacht sich Gl. (4.63) zu:

$$t = \frac{2}{k_1} \left( k_2 - \operatorname{artanh} \left( -\frac{f v}{h k_1} \right) \right) \quad (4.64)$$



Durch Auflösen von Gl. (4.64) nach  $v$  folgt:

$$v = -\frac{k_1 h}{f} \tanh\left(k_2 - \frac{k_1 t}{2}\right) \quad (4.65)$$

Durch Verwendung einer trigonometrischen Ersatzfunktion<sup>4.3.)</sup> und Einsetzen des vollständigen Ausdrucks für  $k_2$  folgt:

$$v = \frac{v_0 + \frac{k_1 h}{f} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)}{1 + \frac{f v_0}{h k_1} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)} \quad (4.66)$$

Da weniger die Zeitabhängigkeit der Überlaufgeschwindigkeit als vielmehr die Ortsabhängigkeit für die Beschreibung des Überlaufschwells relevant ist, wird die Zeit  $t$  durch folgenden Term ersetzt, der sich aus der Bewegung eines festen Körpers auf einer schrägen Ebene ohne Reibung herleitet:

$$t \approx -\frac{v_0}{g \sin \beta} + \sqrt{\frac{v^2}{g^2 \sin^2 \beta} + \frac{2 s}{g \sin \beta}} \quad (4.67)$$

Gl. (4.66) soll unter Berücksichtigung von Gl. (4.67) im nächsten Abschnitt anhand der Versuchsergebnisse verifiziert werden.

In Gl. (4.66) sind die Überlaufgeschwindigkeit  $v$  sowie die Schichtdicke  $h$  unbekannt. Aufgrund der Kontinuitätsgleichung kann die Schichtdicke  $h$  wie folgt ersetzt werden:

$$h = \frac{v_0 \cdot h_0}{v} \quad (4.68)$$

mit:  $v_0, h_0 =$  Überlaufgeschwindigkeit bzw. Schichtdicke am Beginn der Deichbinnenböschung ( $v_0=v_B(s_B=0)$ ,  $h_0=h_B(s_B=0)$ )

#### 4.5.2.2 Sensitivitätsanalyse für das Strömungsfeld auf der Deichbinnenböschung

Im folgenden soll der Einfluß verschiedener Parameter auf die Entwicklung der Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichbinnenböschung untersucht werden. Folgende Parameter werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variiert:

- Schichtdicke  $h_B(s_B=0)$  am Beginn der Deichbinnenböschung
- Überlaufgeschwindigkeit  $v_B(s_B=0)$  am Beginn der Deichbinnenböschung

---

4.3.)

Ersatzfunktion:

$$\tanh(a-b) = \frac{\tanh(a) - \tanh(b)}{1 - (\tanh(a)) \cdot (\tanh(b))}$$

- Reibungsbeiwert  $f$
  - Neigung der Deichbinnenböschung
- (a) **Schichtdicke  $h_B(s_B=0)$ :** Abb. 4.27a zeigt die Entwicklung von Schichtdicke und Überlaufgeschwindigkeit auf der Binnenböschung bei konstantem Reibungsbeiwert ( $f=0,02$ ) und konstanter Anfangsgeschwindigkeit ( $v_B(s_B=0)=1,0\text{m/s}$ ) auf einer 1:3 geneigten Binnenböschung. Je geringer die Schichtdicke am Beginn der Deichbinnenböschung ist, umso eher wird eine gleichförmige Strömung erreicht.
- (b) **Überlaufgeschwindigkeit  $v_B(s_B=0)$ :** Abb. 4.27b zeigt den Einfluß der Geschwindigkeiten am Beginn der Deichbinnenböschung bei konstantem Reibungsbeiwert ( $f=0,02$ ), konstanter Anfangsschichtdicke ( $h_B(s_B=0)=0,10\text{m}$ ) und einer 1:3 Binnenböschung. Es wird deutlich, daß die Änderungen mit zunehmender Überlaufgeschwindigkeit abnehmen.
- (c) **Reibungsbeiwert  $f$ :** Der Reibungsbeiwert  $f$  kann für glatte Böschungen zu  $f=0,02$  angesetzt werden (*Van Gent*, 1995). Für Schüttsteinböschungen kann der Reibungsbeiwert Werte bis  $f=0,6$  annehmen (*Cornett u. Mansard*, 1994). Daher wurde der Reibungsbeiwert in vier Schritten variiert ( $f=0,02$ ;  $f=0,10$ ;  $f=0,20$ ;  $f=0,60$ ). Schichtdicke ( $h_B(s_B=0)=0,10$ ), Überlaufgeschwindigkeit ( $v_B(s_B=0)=1,0\text{m/s}$ ) und Neigung der Deichbinnenböschung ( $1:m=1:3$ ) wurden konstant gehalten. Es wird deutlich, daß eine gleichförmige Strömung ( $\partial v_B/\partial s_B=0$ ) umso früher erreicht wird, je rauher die Böschung ist (Abb. 4.27c).
- (d) **Neigung der Deichbinnenböschung  $m$ :** Die Neigung der Deichbinnenböschung wurde zwischen 1:2 und 1:6 variiert. Schichtdicke ( $h_B(s_B=0)=0,10\text{m}$ ), Überlaufgeschwindigkeit ( $v_B(s_B=0)=1,0\text{m/s}$ ) und Reibungsbeiwert ( $f=0,02$ ) wurden konstant gehalten. Die Überlaufgeschwindigkeiten nehmen mit zunehmender Deichneigung auf der Binnenböschung zu, während die Schichtdicken aus Gründen der Kontinuität abnehmen (Abb. 4.27d).

Die Variationen von Schichtdicke, Überlaufgeschwindigkeit, Reibungsbeiwert und Neigung der Binnenböschung weisen auf einen Grenzwert für die Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichbinnenböschung für  $s_B \rightarrow \infty$  (bzw.  $t \rightarrow \infty$ ) hin. Dieser Fall soll im folgenden etwas genauer untersucht werden.

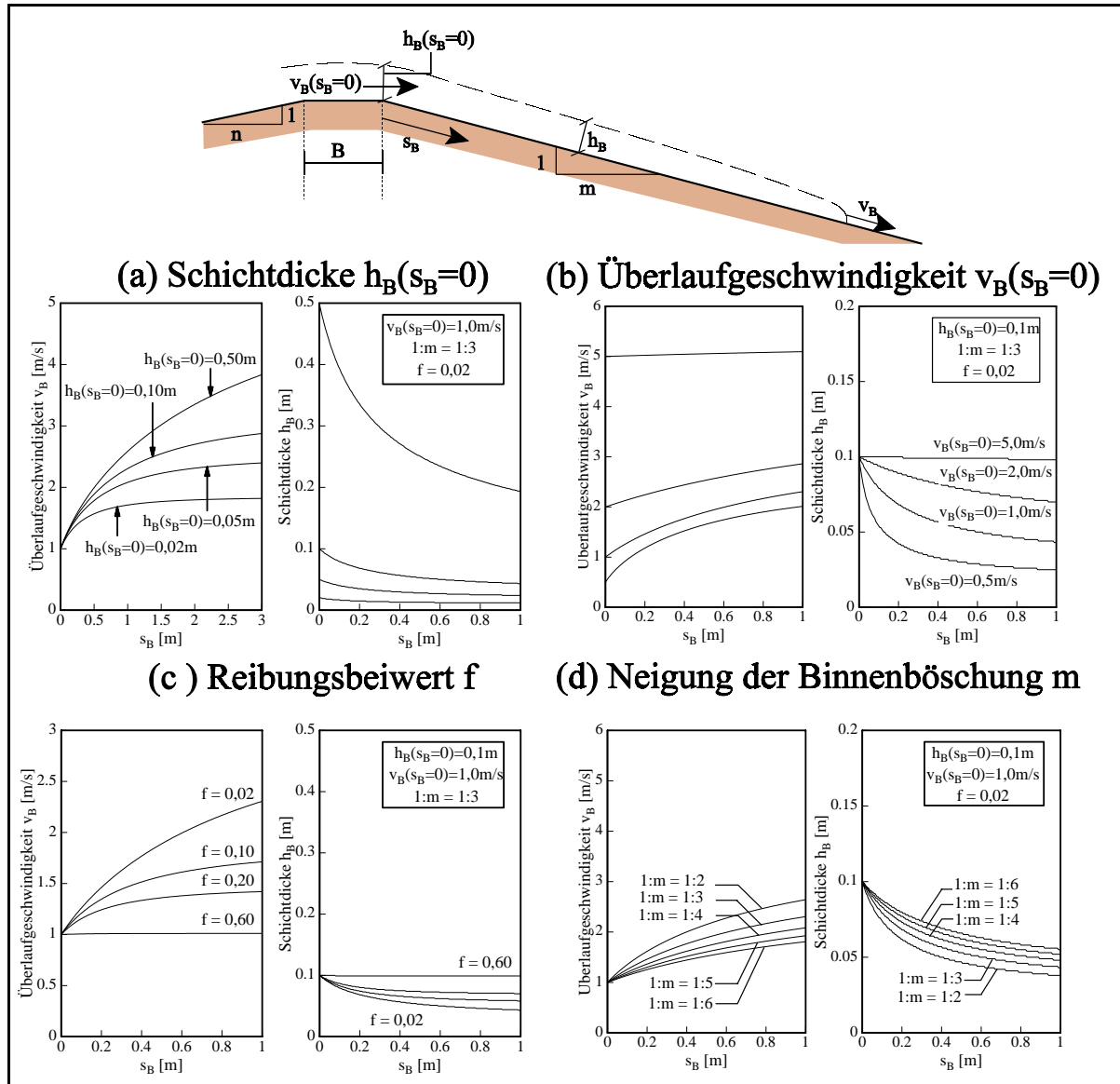


Abb. 4.27: Sensitivitätsanalyse der Einflußparameter für das Strömungsfeld auf der Deichbinnenböschung (Berechnung nach Gl. (4.66) und Gl.(4.67))

Die  $\tanh(\dots)$ -Terme in Gl. (4.66) streben für  $t \rightarrow \infty$  gegen 1. Daraus folgt:

$$v_B = \frac{v_0 + \sqrt{\frac{2 h_B g \sin \beta}{f}}}{1 + v_0 \sqrt{\frac{f}{2 h_B g \sin \beta}}} \quad (4.69)$$

Durch Umformung ergibt sich die folgende einfache Gleichung:

$$v_B = \sqrt{\frac{2 h_B g \sin \beta}{f}} \quad (4.70)$$

In Gl. (4.70) entspricht der Term  $\sqrt{2g/f}$  dem Chezy-Koeffizienten  $C_h$ . Damit nähert sich die Überlaufströmung für  $s_B \rightarrow \infty$  der allgemeinen Fließformel für Freispiegelgerinne.

$$v_B = C_h \sqrt{h_B \sin \beta} \quad (4.71)$$

#### 4.5.2.3 Ermittlung des Reibungsbeiwertes $f$

Im folgenden soll der Reibungsbeiwert  $f$  für die Deichbinnenböschung bestimmt werden. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

- Ermittlung der Überlaufgeschwindigkeit  $v_B(s_B=0)$  am Beginn der Deichbinnenböschung aus den Messungen (Pos. 0 in Abb. 4.28)
- Bestimmung der gemessenen Überlaufgeschwindigkeiten  $v_B(s_B)$  und Schichtdicken  $h_B(s_B)$  an weiteren Meßpositionen auf der Deichbinnenböschung (Pos. 1 bis 3 in Abb. 4.28)
- Anwendung des theoretischen Modells (Gl. 4.66) zur Bestimmung der Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichbinnenböschung
- Berücksichtigung aller Datensätze ( $v_B, h_B$ ) mit Schichtdicken  $h_B > 0,008\text{m}$ , die von Gl. (3.12) unbeeinflusst sind.
- Iterative Berechnung des Reibungsbeiwertes  $f$  mit der Vorgabe, daß das Verhältnis aus berechneter Überlaufgeschwindigkeit  $v_{B,ger}(s_B)$  zu gemessener Überlaufgeschwindigkeit  $v_{B,gem}(s_B)$  gleich 1 sein muß.

Der Reibungsbeiwert wurde auf diese Weise für alle verfügbaren Datensätze zu  $f=0,0058$  bestimmt ( $\sigma'=10,5\%$ ). Dieser Wert ist etwas niedriger als Anhaltswerte aus dem Schrifttum. So empfiehlt *Van Gent* (1995) einen Reibungsbeiwert von  $f=0,02$  für glatte Böschungen und auch aus der Arbeit von *Schulz* (1992) können Reibungsbeiwerte zwischen 0,017 und 0,022 ermittelt werden. Beide Autoren arbeiten jedoch mit Betonböschungen, die rauher als die experimentell verwendete Holzböschung sind. Da weder Schichtdicke noch Überlaufgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluß auf den Reibungsbeiwert haben (Abb. 4.28), kann von hydraulisch rauhen turbulenten Strömungsverhältnissen ausgegangen werden. Außerdem kann von einer konstanten Verteilung der Geschwindigkeit über die Wassertiefe ausgegangen werden, da sonst ein Einfluß der Schichtdicke auf die Überlaufgeschwindigkeiten in Abb. 4.28 vorhanden wäre.

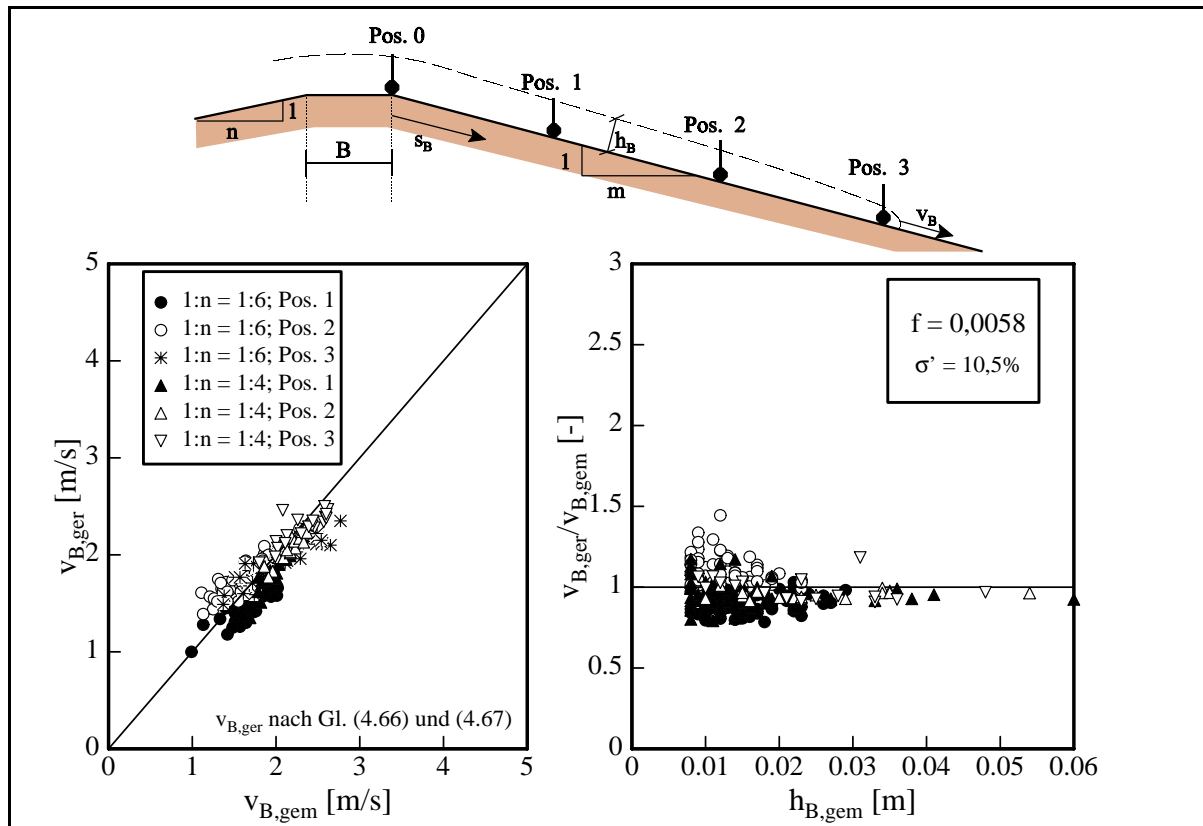


Abb. 4.28: Ermittlung des Reibungsbeiwertes  $f$  aus Modellversuchen

#### 4.5.2.4 Anwendung der theoretischen Lösung auf mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und mittlere Wasserüberdeckung

Die theoretische Lösung zur Bestimmung der Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten (Gl. 4.66 und 4.67) soll im folgenden auch auf die mittlere Wasserüberdeckung ( $\bar{h}_B$ ) und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten ( $\bar{v}_B$ ) angewandt werden (Def. s. Abschnitt 3.4) (Abb. 4.29), die für die Infiltration der Kleidecke eines Deiches maßgebend sind (Abb. 4.11).

Die Eingangsparameter für die mittleren Strömungsgrößen können für die mittlere Wasserüberdeckung aus Gl. (4.25) und für mittlere Strömungsgeschwindigkeiten aus Gl. (4.41) bestimmt werden. Aufgrund der sehr geringen Schichtdicken sind die Abweichungen ( $\sigma' = 19,5$ ) insgesamt höher als bei den Überlaufgeschwindigkeiten in Abschnitt 4.5.2.2. Dies liegt an der Problematik der Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in sehr kleinen Schichtdicken (Abb. 4.29). Hier ist weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der technischen Erfassung geringer Strömungsgrößen vorhanden. Die Untersuchung zeigt jedoch, daß das theoretische Modell auch auf mittlere Parameter übertragbar ist. Damit kann eine mittlere Überstauhöhe  $\bar{h}_B$  für die Deichbinnenböschung als Eingangsgröße für die Infiltration ermittelt werden.

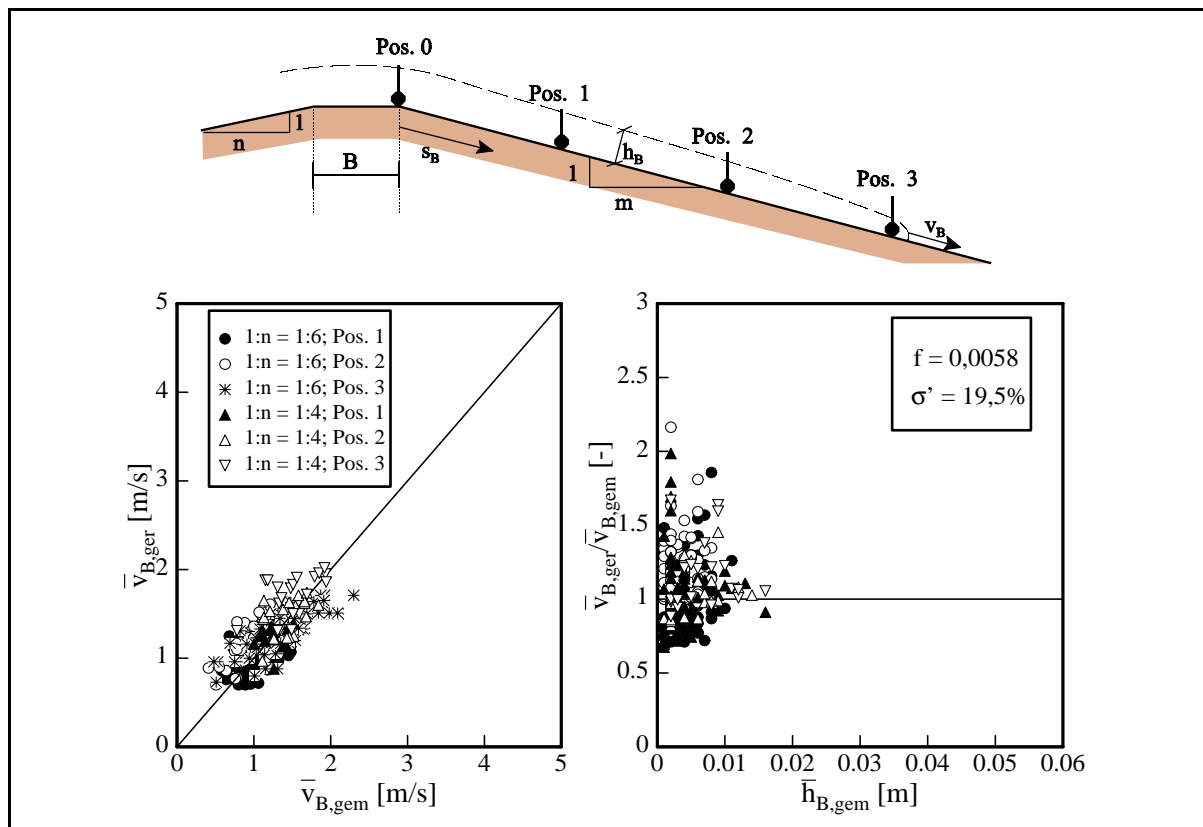


Abb. 4.29: Anwendung des theoretischen Überlaufmodells auf mittlere Strömungsgeschwindigkeiten  $\bar{v}_B$  und mittlere Schichtdicken  $\bar{h}_B$

#### 4.5.2.5 Schichtdicken auf der Deichbinnenböschung

Das theoretische Modell aus vereinfachter Bewegungsgleichung (Gl. 4.66) und Kontinuitätsgleichung (Gl. 4.68) ist nur iterativ lösbar. Da dies einen relativ hohen Rechenaufwand erfordert, sollen im folgenden sowohl die iterative Lösung als auch eine Näherungslösung zur Bestimmung der Schichtdicken dargestellt werden (Abb. 4.30).

##### (a) Theoretische Näherungslösung

Schichtdicke ( $h_B(s_B=0)$ ) und Überlaufgeschwindigkeit ( $v_B(s_B=0)$ ) am Beginn der Deichbinnenböschung sind aus den Berechnungen für die Deichkrone bekannt. Daher kann in Gleichung 4.66 als erste Näherung die Schichtdicke  $h_B(s_B)$  durch die Schicht-

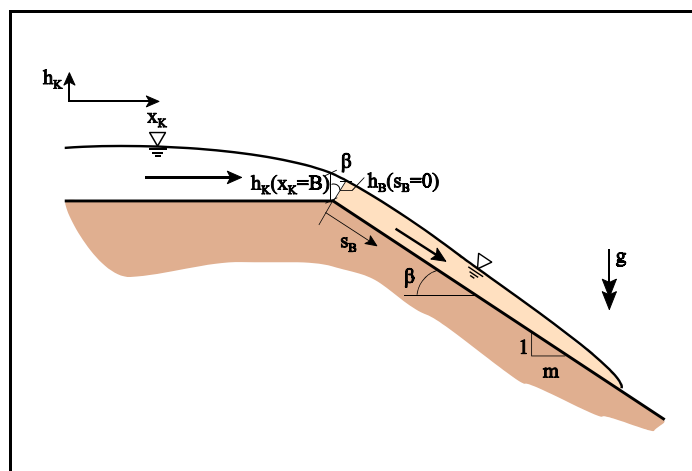


Abb. 4.30: Definition der Schichtdicke  $h_B$  des Überlaufschwalls auf der Deichbinnenböschung

dicke am Beginn der Deichbinnenböschung ( $h_B(s_B=0)$ ) ersetzt werden. Somit kann die Überlaufgeschwindigkeit  $v_B(s_B)$  in erster Näherung berechnet werden.

Aus Gründen der Kontinuität muß gelten:

$$h_B(s_B) = \frac{v_B(s_B=0) \cdot h_B(s_B=0)}{v_B(s_B)} \quad (4.72)$$

Auf diese Weise wird eine zweite Näherung für  $h_B(s_B)$  ermittelt. Mit diesem Wert kann dann die Überlaufgeschwindigkeit  $v_B(s_B)$  in zweiter Näherung nach Gl. (4.66) ermittelt werden. Bereits zwei Iterationen sind ausreichend, damit das Verhältnis aus  $h_{B,ger}/h_{B,gem}$  zu 1,0 wird (Abb. 4.31).

### (b) Empirischer Ansatz

Alternativ zur iterativen Lösung der Bewegungsgleichung wird im folgenden auch noch eine einfache empirische Gleichung für die Ermittlung der Schichtdicken vorgestellt. Dazu wurde in Abb. 4.32 in Analogie zu den Untersuchungen auf Deichaußenböschung und Deichkrone die relative Schichtdicke  $c_2(s_B)/c_2(s_B=0)$  als Funktion der relativen Weglänge  $s_B/B$  dargestellt, wobei die Kronenbreite  $B$  als festes Maß gewählt wurde. Infolge der Beschleunigung des Überlaufschwells auf der Deichbinnenböschung nehmen die Schichtdicken  $h_B$ , ausgedrückt durch das Steigungsmaß  $c_2$ , ab ( $r=0,96$ ;  $\sigma'=29\%$ ) (Abb. 4.33).

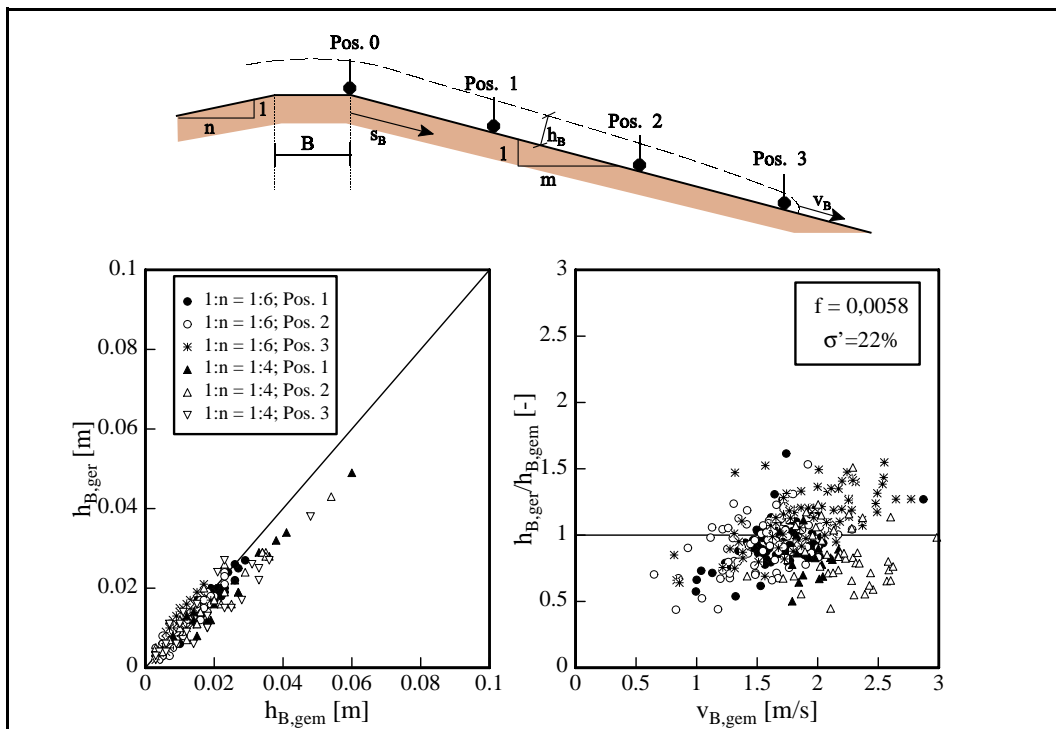


Abb. 4.31: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Schichtdicken auf der Deichbinnenböschung (Analytische Näherungslösung)

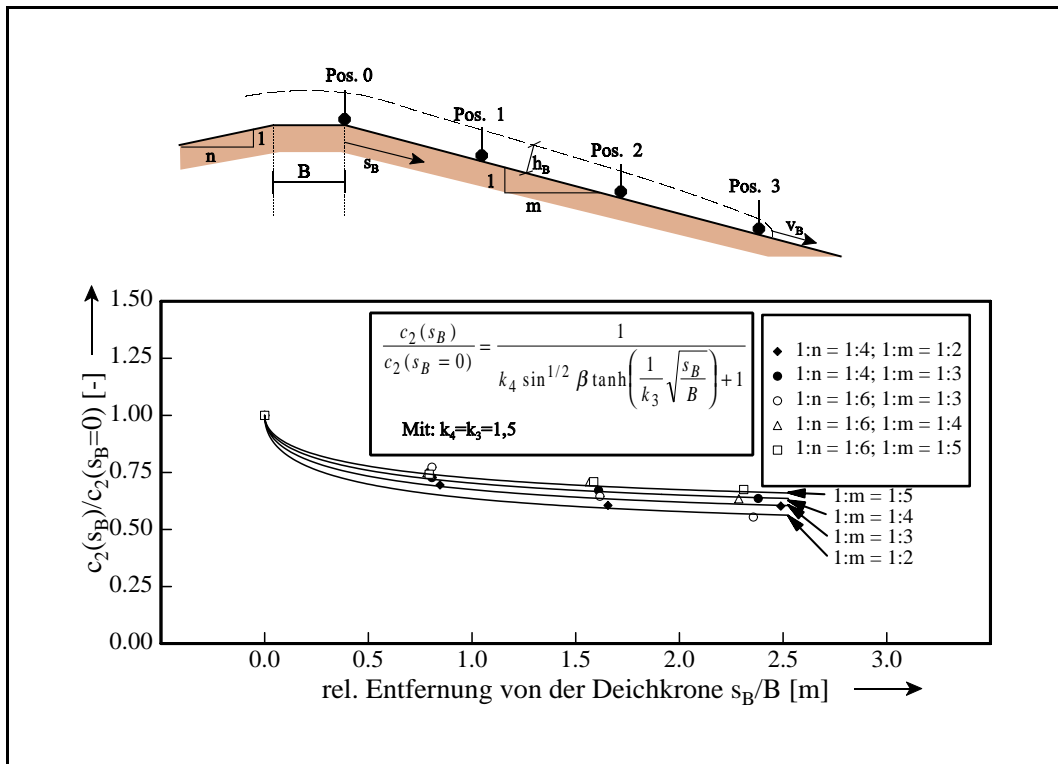


Abb. 4.32: Veränderung der Schichtdicke  $h_B$  auf der Binnenböschung

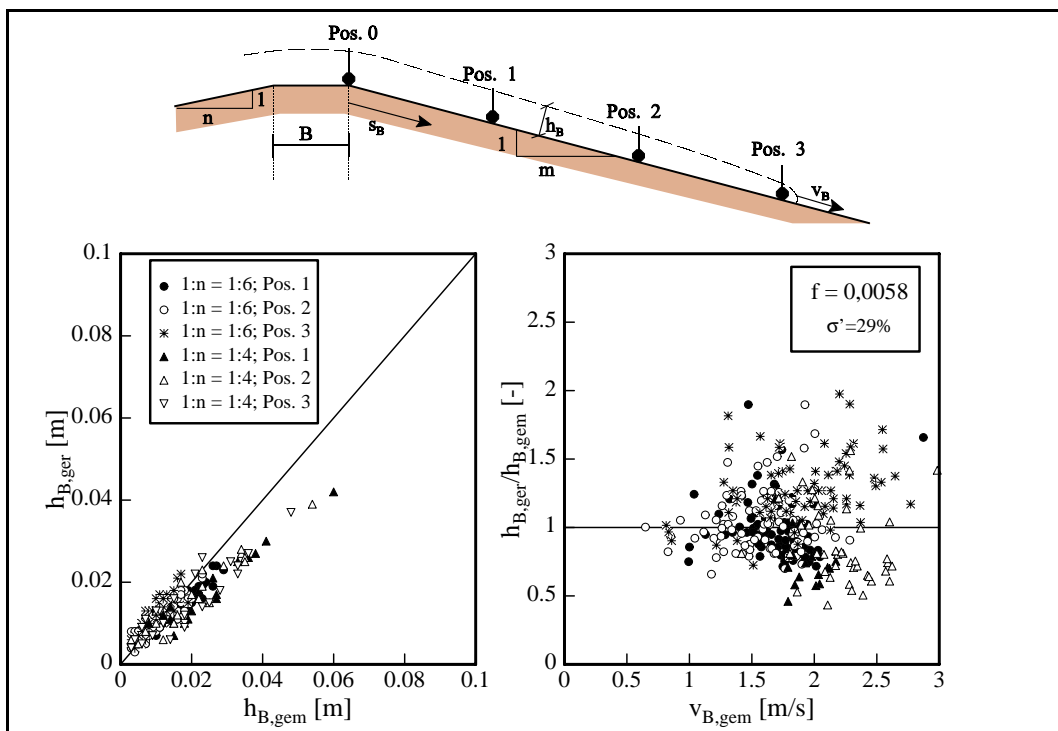


Abb. 4.33: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Schichtdicken auf der Deichinnenböschung (Empirischer Ansatz)



Es folgt:

$$\frac{h_B(s_B)}{h_B(s_B=0)} = \frac{c_2(s_B)}{c_2(s_B=0)} = \frac{1}{1,5 \sin^{1/2}\beta \tanh\left(\frac{1}{1,5} \sqrt{\frac{s_B}{B}}\right) + 1} \quad (4.73)$$

mit:  $\beta$  = Neigung der Deichbinnenböschung

Gl. (4.72) nähert sich einem Grenzwert  $c_2(s_B)_{gr}$ . Dieser kann zu:

$$h_B(s_B)_{gr} = \frac{1}{1,5 \sin^{1/2}\beta + 1} h_B(s_B=0) \quad (4.74)$$

bestimmt werden. Der Reibungsbeiwert  $f$  wird bei diesem empirischen Ansatz nicht explizit berücksichtigt.

### 4.5.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Ein neuer Ansatz zur Bestimmung der **mittleren Wellenüberlaufrate** für Seedeiche wurde unter Berücksichtigung der physikalischen Randbedingungen ( $q(R_C=0)$  und  $q(R_C=A_{98})$ ) aus der allgemeinen „Wehrformel“ für  $R_C=0$  und Anwendung eines exponentiellen Überlaufmodells für  $R_C>0$  entwickelt ( $\sigma'=23\%$ ). Für *Wellenspektren* lautet dieser Ansatz:

$$\frac{q}{\sqrt{2 g H_S^3}} = 0,038 \xi_d \exp\left(-5,5 \frac{R_C}{A_{98}}\right) \quad \text{für } \xi_d < 2,0$$

$$\frac{q}{\sqrt{2 g H_S^3}} = \left(0,096 - \frac{0,160}{\xi_d^3}\right) \cdot \exp\left(-5,5 \frac{R_C}{A_{98}}\right) \quad \text{für } \xi_d \geq 2,0$$

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Bestimmung von sehr kleinen Wellenüberlaufraten ( $R_C \geq A_{98}$ ), d.h. z.B. für die Nachbemessung von Deichen deren Kronenhöhe auf  $A_{98}$  oder höher festgelegt wurde. Dieser Fall wurde aufgrund der Zielsetzung der Arbeit nicht berücksichtigt, da eine Messung des Strömungsfeldes bei sehr kleinen Wellenüberlaufmengen aufgrund von Maßstabeffekten im kleinmaßstäblichen Modellversuch nicht möglich ist.

Die Notwendigkeit von Untersuchungen für  $R_C \geq A_{98}$  wird auch beim Vergleich von mittleren Wellenüberlaufraten  $q$  mit **maximalen Wellenüberlaufraten**  $q_{max}$  deutlich, die aus dem Produkt von Schichtdicke und Überlaufgeschwindigkeit ermittelt wurden und somit dem Durchfluß der Überlauffront entsprechen. Maximale Wellenüberlaufraten können das 60-fache der mittleren Wellenüberlaufrate erreichen. Unsicherheiten in der Ermittlung der maximalen Wellenüberlaufrate haben ihre Ursache in den Ansätzen für Schichtdicke und Auflaufgeschwindigkeit auf der Deichaußenböschung, da  $h_A(A_{98})=0$  und  $v_A(A_{98})=0$  gilt und somit die maximale Wellenüberlaufrate  $q_{max}(R_C=A_{98})=0$  ist.

Für die Beschreibung der **Überlaufgeschwindigkeiten und Schichtdicken** auf der Deichbinnenböschung wurde ein theoretischer Ansatz auf Grundlage der allgemeinen Bewegungsgleichung und der Kontinuitätsgleichung entwickelt, der iterativ gelöst werden muß. Der Ansatz setzt konstante Strömungsverhältnisse über die Wassertiefe sowie hydrostatische Druckverhältnisse an der Böschungsoberfläche voraus und lautet:

$$v_B = \frac{v_B(0) + \frac{k_1 h_B}{f} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)}{1 + \frac{f v_B(0)}{h_B k_1} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)}$$

mit:

$$t \approx -\frac{v_B(0)}{g \sin \beta} + \sqrt{\frac{v_B^2(0)}{g^2 \sin^2 \beta} + \frac{2 s_B}{g \sin \beta}}$$
$$k_1 = \sqrt{\frac{2 f g \sin \beta}{h_B}}$$

Der Reibungsbeiwert  $f$  wurde auf Grundlage der Modellversuche zu  $f = 0,0058$  bestimmt. Für Beton- und Asphaltböschungen sollte mit  $f=0,02$  gerechnet werden. Der theoretische Ansatz zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl für Schichtdicken ( $\sigma'=20\%$ ) als auch für Überlaufgeschwindigkeiten ( $\sigma'=10\%$ ), wobei die Streuungen im wesentlichen auf die Schwierigkeiten bei der Bestimmung dünner Schichtdicken und der dazugehörigen Überlaufgeschwindigkeiten zurückzuführen sind. Zusätzlich werden Näherungslösungen für die praktische Anwendbarkeit der theoretischen Lösung vorgestellt, um die iterative Lösung zu vermeiden.

Eine Validation des Verfahrens anhand großmaßstäblicher Modellversuche für Deiche sowie eine Überprüfung für rauhe Böschungen werden empfohlen. Zusätzlich sind Untersuchungen erforderlich, um die Druckverteilung an der Deichoberfläche sowie die Geschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe zu ermitteln.

Der theoretische Ansatz kann für  $s_B \rightarrow \infty$  auf die folgende einfache Gleichung zurückgeführt werden:

$$v_B = \sqrt{\frac{2 g}{f}} \cdot \sqrt{h_B \sin \beta},$$

die der allgemeinen Fließformel für Freispiegelgerinne entspricht.

#### 4.6 Anwendungsbeispiel

Beispielhaft soll im folgenden die Anwendung der entwickelten Ansätze für einen einfachen 1:6 Deich dargestellt werden. Dazu sollen die Schichtdicken und Geschwindigkeiten auf der Deichaußenböschung, Deichkrone und Deichbinnenböschung ermittelt werden.

Hierfür wurde ein klassischer 1:6 Deich mit 1:3 Binnenböschung ausgewählt. Die Breite der Deichkrone beträgt 3,0m. Die Wellenparameter am Deichfuß wurden zu  $H_S=2,0\text{m}$  und  $T_m=7,0\text{s}$  bei einer Freibordhöhe von  $R_C=1,0\text{m}$  vorgegeben. Die Wellen laufen küstennormal auf den Deich zu. Die Dechoberfläche besteht aus Beton ( $f=0,02$ ).

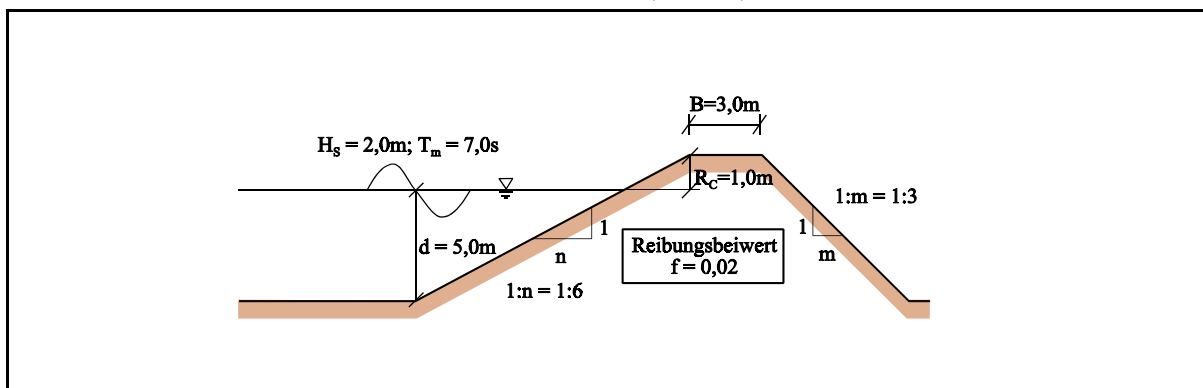


Abb. 4.34: Anwendungsbeispiel

##### (a) Ermittlung der Randbedingungen

- Tiefwasserwellenlänge  $L_0$

$$L_0 = \frac{g T_m^2}{2 \pi} = \frac{9,81 \cdot 7,0^2}{2 \pi} = 76,5\text{m}$$

- Brecherkennzahl  $\xi_d$

$$\xi_d = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_S/L_0}} = \frac{1}{6 \sqrt{2 / 76,5}} = 1,03 \Rightarrow \text{Sturzbrecher}$$

- Wellenauflaufhöhe  $A_{98}$

$$A_{98} = 3,0 H_S \tanh(0,65 \xi_d) = 3,0 \cdot 2,0 \tanh(0,65 \cdot 1,03) = 3,51\text{m}$$

##### (b) Ermittlung der Strömungsgrößen am Anfang der Deichkrone ( $z_A=R_C$ )

- Schichtdicke

$$h_{A,50} = 0,168 x_* \tan \alpha = 0,168 (6 \cdot 3,51 - 6 \cdot 1,0) \frac{1}{6} = 0,42\text{m}$$

mit:  $x_* = x_Z - x_A = n \cdot A_{98} - n \cdot z_A$  und  $z_A = R_C$

- Auflaufgeschwindigkeit

$$v_{A,50} = \left( \frac{\pi \cdot H_S}{T_m} \right) 0,75 \cdot \xi_d \sqrt{\frac{A_{98} - z_A}{H_S}}$$

$$= \left( \frac{\pi \cdot 2,0}{7,0} \right) 0,75 \cdot 6,0 \cdot 1,03 \sqrt{\frac{3,51 - 1,0}{2,0}} = 4,68 \text{ m/s}$$

(c) Ermittlung der Strömungsgrößen am Ende der Deichkrone ( $x_K=B$ )

- Schichtdicke

$$h_K(B) = h_K(0) \exp\left(-0,75 \frac{x_K}{B}\right) = 0,42 \exp(-0,75 \cdot 1,0) = 0,20 \text{ m}$$

- Überlaufgeschwindigkeit

$$v_K(B) = v_K(0) \exp\left(-\frac{x_K \cdot f}{2 h_K}\right) = 4,68 \exp\left(-\frac{3,0 \cdot 0,02}{2 \cdot 0,2}\right) = 4,03 \text{ m/s}$$

- Durchfluß  $q_{\max}$  am Ende der Deichkrone

$$q_{\max} = h_K(B) \cdot v_K(B) = 0,20 \cdot 4,03 = 0,81 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$$

(d) Ermittlung der Strömungsgrößen am Ende der Deichbinnenböschung

- Wegstrecke bis zum Ende der Deichbinnenböschung

$$s_B = z_K / \sin \beta = 6,0 / \sin 18,43^\circ = 19,0 \text{ m}$$

- Überlaufgeschwindigkeit

$$v_B = \frac{v_B(0) + \frac{k_1 h_B}{f} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)}{1 + \frac{f v_B(0)}{h_B k_1} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)} \quad \text{mit:} \quad k_1 = \sqrt{\frac{2 f g \sin \beta}{h}}$$

und:

$$t = -\frac{v_B(0)}{g \sin \beta} + \sqrt{\frac{v_B^2(0)}{g^2 \sin^2 \beta} + \frac{2 s_B}{g \sin \beta}}$$

$$\Rightarrow v_B = 5,80 \text{ m/s}$$

- Schichtdicke

$$h_B = \frac{v_B(0) \cdot h_B(0)}{v_B} = \frac{4,02 \cdot 0,20}{5,8} = 0,14 \text{ m}$$

(e) Ermittlung der mittleren Wellenüberlaufrate

$$\begin{aligned} q &= 0,038 \, \xi_d \sqrt{2 \, g \, H_s^3} \exp\left(-5,5 \frac{R_C}{A_{98}}\right) \\ &= 0,038 \, 1,03 \sqrt{2 \, 9,81 \, 2,0^3} \exp\left(-5,5 \frac{1,0}{3,51}\right) = 0,10 \text{ m}^3/(\text{s m}) \end{aligned}$$

Damit beträgt die mittlere Wellenüberlaufrate in diesem Fall nur 1/8 der Überlaufrate  $q_{\max}$ .

## 5. Gesamtzusammenfassung, Bewertung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Bisherige Untersuchungen zum Wellenüberlauf wurden insbesondere hinsichtlich der Ermittlung mittlerer Wellenüberlaufraten durchgeführt. Die mittlere Wellenüberlaufrate ist allerdings nicht ausreichend, um in Zukunft die Wechselwirkungen zwischen Wellenüberlauf und bodenmechanischen Prozessen zu beschreiben. Dieser Aspekt gewinnt besondere Bedeutung unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten bei der Festlegung des Bemessungswasserstandes und des Bemessungsseegangs. Aufgrund dieser Unsicherheiten kann Wellenüberlauf nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Auswirkungen des Wellenüberlaufs auf den Deich sind zu berücksichtigen. Daher ist es erforderlich, die maßgebenden Strömungsparameter des Wellenüberlaufs (Schichtdicken, Überlaufgeschwindigkeiten) zu bestimmen, die mit dem Deichboden in Wechselwirkung stehen. Eine Übersicht der Schlüsselergebnisse dieser Arbeit ist in Abb. 5.1 dargestellt. Auf Grundlage dieser Abbildung können die Strömungsgrößen auf der Deichbinnenböschung als Funktion der Wellenparameter am Deichfuß ermittelt werden.

Die Grundlage für die Bestimmung dieser Strömungsparameter stellen theoretische und experimentelle Untersuchungen dar. Die experimentellen Untersuchungen wurden im kleinmaßstäblichen Modell im Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts an idealisierten Deichgeometrien im Rahmen des DFG-Projektes "Hydrodynamische Belastung der Binnenböschung von Seedeichen durch Wellenüberlauf" (DFG OU 1/5-1) sowie des EU-MAST-III-OPTICREST-Projektes<sup>5.1.)</sup> (MAS03-CT97-0116) durchgeführt. Da die Übertragbarkeit kleinmaßstäblicher Versuche auf die Natur von Maßstabs Effekten (Viskosität, Oberflächenspannung) beeinflusst wird, wurden umfangreiche theoretische Überlegungen hinsichtlich des Einflusses von Viskosität und Oberflächenspannung auf die Modellergebnisse zur Wellenbewegung, zum Wellenbrechen, zum Wellenauflauf und zum Wellenüberlauf durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, daß Maßstabs effekte keinen signifikanten Einfluß auf die Ergebnisse dieser Arbeit haben. Ein Einfluß ist erst bei sehr kleinen Wellenüberlaufmengen vorhanden, wenn die Freibordhöhe der Wellenauflaufhöhe entspricht.

Eine Bestimmung der Strömungsparameter des Wellenüberlaufs ist ohne eine Beschreibung des **Wellenbrechens** und des Wellenauflaufverhaltens auf der Deichaußenböschung nicht möglich. Daher sind bei Wellenüberlaufuntersuchungen zuerst Brechertyp, Brechpunkt, Auftreffpunkt der brechenden Welle sowie Wellenauflaufhöhe auf einer virtuell verlängerten Deichböschung zu bestimmen.

---

5.1.) OPTICREST = The **Optimisation** of **Crest** Level Design of Sloping Coastal Structures through Prototype Monitoring and Modelling

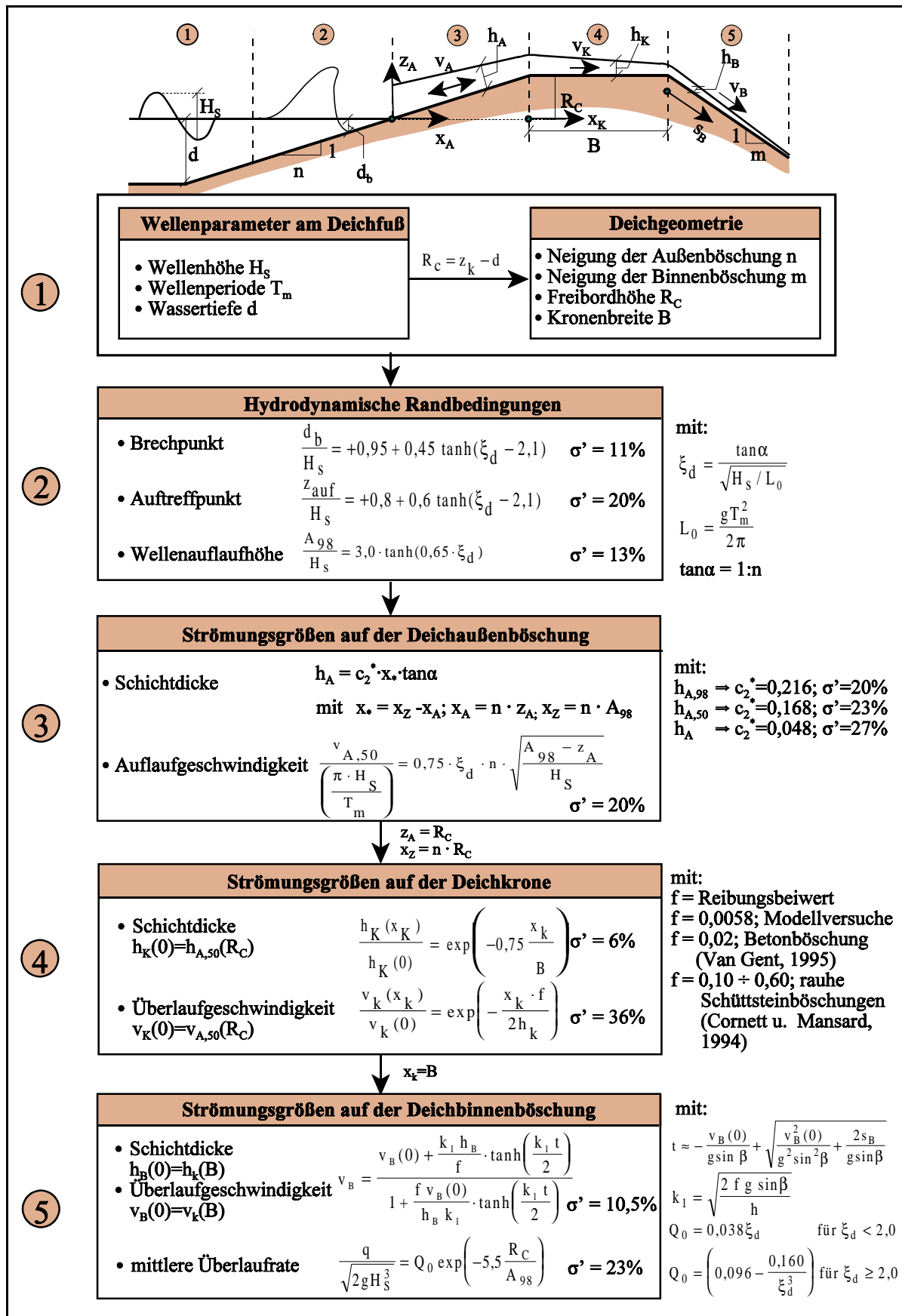


Abb. 5.1: Verfahren zur Bestimmung der Strömungsgrößen des Wellenüberlaufschwells

Hierfür wurden im Rahmen dieser Arbeit empirische Formeln entwickelt und mit bestehenden Ansätzen verglichen, um die Vorteile sowie die Gültigkeitsbereiche der neu entwickelten Ansätze darzulegen. Eine erneute Bestimmung dieser Parameter war auch deshalb erforderlich, weil der Einfluß des Wellenüberlaufs auf das Brechverhalten unklar war.

Die Bestimmung der Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten auf der **Deichaußenböschung** fand unter Erweiterung und Verifizierung bestehender Ansätze für Schichtdicken und Auflaufgeschwindigkeiten statt. Erweiterungen waren insbesondere hinsichtlich des Einflusses des Wellenüberlaufs, der Deichneigung, des Brechverhaltens und von Wellenspektren erforderlich. Auf diese Weise konnten dann die Initialbedingungen (Überlaufgeschwindigkeit, Schichtdicke) für den Wellenüberlaufschwall am Beginn der Deichkrone ermittelt werden.

Da für die **Deichkrone** keine Ansätze zur Beschreibung des Strömungsfeldes existierten, wurde für die Überlaufgeschwindigkeiten eine analytische Näherungslösung hergeleitet und experimentell verifiziert. Die Schichtdicken auf der Deichkrone werden anhand einer einfachen empirischen Gleichung beschrieben. Diese beiden Gleichungen ermöglichen die Beschreibung der Strömungsgrößen vom Beginn bis zum Ende der Deichkrone, wo der Überlaufschwall auf die Deichbinnenböschung trifft. Vereinfachend werden eine konstante Geschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe, eine Vernachlässigung der Reibungsanteile in Strömungsrichtung, eine horizontale Deichkrone sowie konstante Druckverhältnisse an der Deichoberfläche vorausgesetzt.

Zur Beschreibung des Wellenüberlaufs auf der **Deichbinnenböschung** wurden sowohl die mittlere Wellenüberlaufrate als auch die Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten des Überlaufschwalls untersucht. Für die Bestimmung der mittleren Wellenüberlaufrate wurde ein neues Verfahren auf der Grundlage der „Wehrformel“ entwickelt, das sowohl Wellenüberlauf ohne Freibord ( $R_C=0$ ) als auch Wellenüberlauf für  $R_C=A_{98}$  berücksichtigt. Freibordhöhen  $R_C$  größer  $A_{98}$  wurden nicht berücksichtigt. Für die Bestimmung der beiden anderen Strömungsgrößen auf der Deichbinnenböschung lagen bislang weder experimentelle Untersuchungen noch theoretische Ansätze vor. Daher wurde eine analytische Näherungslösung hergeleitet und anhand der Modellergebnisse verifiziert. Diese Lösung ermöglicht die Bestimmung von Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichbinnenböschung für beliebige Deichneigungen und Böschungsrauheiten. Es wurden die gleichen Annahmen wie für die analytische Näherungslösung für die Deichkrone bei variabler Neigung der Deichbinnenböschung getroffen.

Die beiden analytischen Verfahren für Deichkrone und Deichbinnenböschung setzen eine eindimensionale Strömung sowie hydrostatische Druckverhältnisse voraus. Als einziger freier Parameter muß der Reibungsbeiwert  $f$  experimentell bestimmt werden. Dieser Parameter wurde für die sehr glatte Modellböschung zu  $f=0,0058$  ermittelt.



## 5.2 Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Es wurde ein analytisches Näherungsverfahren zur Bestimmung der Strömungsgrößen im Wellenüberlauf hergeleitet und anhand von Modellversuchen für verschiedene Deichgeometrien experimentell verifiziert. Trotz der Allgemeingültigkeit der Lösung sind weitergehende Untersuchungen zur Wellenüberlaufströmung erforderlich.

Im folgenden sollen daher kurz die wesentlichen offenen Fragestellungen dargelegt werden. Ein detaillierter Ausblick auf künftigen Forschungsbedarf wurde bereits am Ende jedes Abschnitts gegeben. Zur Beantwortung dieser offenen Fragestellungen sind weitergehende theoretische Untersuchungen (T), klein- (K) und großmaßstäbliche (G) Modellversuche und die Entwicklung und Verifikation eines numerischen Modells (N) erforderlich.

- (a) Detailuntersuchungen zum Strömungsfeld auf Deichaußenböschung, Deichkrone und Deichbinnenböschung
  - Kann der analytische Ansatz zur Beschreibung der Strömungsgrößen des Wellenüberlaufs für andere Böschungsrauhheiten (z.B. Gras) bestätigt werden ? (K,G)
  - Welche hydrodynamischen Drücke wirken an der Deichoberfläche ? (T,G)
  - Kann die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit über die Schichtdicke des Wellenüberlaufschwells bestätigt werden ? (T,G)
  - Welche Geschwindigkeiten und Schichtdicken treten im Wellenüberlauf auf, wenn die Freibordhöhe der Wellenaufbauhöhe  $A_{98}$  entspricht ? (G)
- (b) Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses unberücksichtigter Parameter auf den Wellenüberlauf (s. Abschnitt 2.5.1)
  - Welche Auswirkungen haben Veränderungen in der Deichgeometrie (Berme, konvexes bzw. konkaves Profil der Deichaußenböschung, Breite und Neigung der Deichkrone, Kronenmauer, Vorstrandneigung, etc.) auf die Strömungsparameter des Wellenüberlaufs ? (N)
  - Welche räumliche Ausdehnung besitzt der Wellenüberlauf und welchen Einfluß haben Wellenangriffsrichtung und Kurzkämmigkeit des Seegangs ? (3D-K, N)
  - Welchen Einfluß hat naturnaher Seegang (Doppel- und Mehr-Peak-Spektren) auf die Prozesse des Wellenüberlaufs ? (K, G, N)
  - Welchen Einfluß hat der Wind auf die Wellenüberlaufströmung? (G)
  - Welchen Einfluß haben Strömungen am Deichfuß auf den Wellenüberlauf (K, N)

Ideal wären auch Naturuntersuchungen zum Wellenüberlauf an Seedeichen. Aufgrund der Seltenheit und Unvorhersehbarkeit von Wellenüberlaufereignissen in der Natur sind entsprechende Untersuchungen an bestehenden Seedeichen allerdings nicht praktikabel und sehr kostenintensiv.

## 6. Schrifttum

- Ahrens, J.P. u. Heimbaugh, M.S. (1988) Seawall Overtopping Model. Proc. 21st. Int. Conf. on Coastal Eng.. Malaga. S. 795-806
- Aschenbrenner, L. (1999) Studienarbeit im Fachgebiet Hydromechanik und Küsteningenieurwesen zum Meßverhalten von Strömungspropellern. TU Braunschweig (unveröffentlicht)
- Battjes, J.A. (1974) Surf Similarity. Proc. 14th Int. Conf. on Coastal Eng.. Kopenhagen. S. 466-480
- Bezirksregierung Weser-Ems (1997) Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems
- Biesel, F. (1949) Calcul de l'ammortissement d'une houle dans un liquide visqueux de profondeur finie. La Houille Blanche. 4
- Bolrich, G. u. Preissler, G. (1992) Technische Hydromechanik 1. VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin
- Bruun, P. u. Günbak, A.R. (1976) New Design Principles for Rubble Mound Structures. Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Eng.. Honolulu. S. 2429-2473
- Burcharth, H.F. (1998) Hydraulic Responses - Wave Runup, Rundown and Overtopping. OPTICREST Start-up Workshop. Gent.
- Cornett, A. u. Mansard, E. (1994) Wave Stresses on Rubble-Mound Armour. Proceedings 24th Int. Conf. on Coastal Engineering. Kobe. S. 986-1000
- Cross, R.H. u. Sollitt, C.K. (1972) Wave Transmission by Overtopping. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. Vol. 98. No. WW3. S. 295-309
- Dodd, N. (1998) Numerical Model of Wave Run-up, Overtopping and Regeneration. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 124. No. 2. S. 73-81
- Douglass, S.L. (1984) Irregular Wave Overtopping Rates. Proceedings 19th Int. Conf. on Coastal Engineering. Houston. Texas. S. 316-327
- Douglass, S.L. (1989) The Influence of Wind on Nearshore Breaking Waves. Drexel University
- Franco, C. u. Franco, L. (1999) Overtopping Formulas for Caisson Breakwaters with nonbreaking 3D-waves. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 125. No. 2. S. 98-108
- Franzius, L. (1965) Wirkung und Wirtschaftlichkeit von Rauhdeckwerken im Hinblick auf den Wellenauflauf. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau. H. 25. S. 149-268
- Freeman, J.C. u. Le Méhauté, B. (1964) Wave Breakers on a Beach and Surges on a dry Bed. Journal of Hydraulics Division. ASCE. Vol. 90. S. 187-216
- Freie und Hansestadt Hamburg (1999) Hochwasserschutz in Hamburg. Herausgeber: Baubehörde - Amt für Wasserwirtschaft FHH
- Führböter, A. (1971) Über die Bedeutung des Lufteinschlages für die Energieumwandlung in Brandungszonen. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover. H. 36. S. 1-16
- Führböter, A. u. Witte, H.-H. (1989) Wellenbelastung an Seedeichen. Strömungsgeschwindigkeiten beim Wellenauflauf auf einer Böschung der Neigung 1:n = 1:6. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft. 44 Bd.. S. 176-194
- Führböter, A. (1991) Wellenbelastung von Deich- und Deckwerksböschungen. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft. Bd. 46. S. 225-282
- Galvin, C.J. (1968) Breaker Classification on Three Laboratory Beaches. Journal of Geophysical Research. Vol. 73. No. 12. S. 3651-3659
- Goda, Y. (1985) Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo Press
- Grüne, J. (1982) Wave Run-up caused by natural Storm Surge Waves. Proceedings 18th Conf. on Coastal Eng.. Kapstadt. S. 785-803
- Grüne, J. (1996) Field Study on Wave Run-up on Seadykes. Proceedings 25th Int. Conf. on Coastal Eng.. Orlando. S. 994-1007

- Hashida, M.; Matsunaga, N.; Irie, I. (1996) Landward Transport of Spray Generated from a Wave Absorbing Sea Wall. Proceedings 25th Int. Conf. on Coastal Engineering. Orlando. S. 1022-1033
- Hedges, T.S. u. Reis, M.T. (1997) Random Wave Overtopping of Simple Seawalls: A New Regression Model. Report No. CE/1/97. Department of Civil Engineering. University of Liverpool.
- Herbich, J.B. (1990) Wave Run-up and Overtopping. in " Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Ed.: Herbich, J.B.. Vol. 1. GULF Publishing Company. S.727-834
- Hibberd, S. u. Peregrine, D.H. (1979) Surf and Run-up on a beach: a uniform bore. Journal of Fluid Mechanics. Vol. 95. Part 2. S. 323-345
- Hughes, S.A. (1995) Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 7. World Scientific
- Hunt, A. (1959) Design of Seawalls and Breakwaters. Journal of the Waterways and Harbors Division. S. 123-152
- IAHR - AIRH (1986) Parametres des Etats de Mer. 25 S.
- Iribarren, R. u. Casto Nogales (1949) Protection des Ports. S. 31-80
- Iversen, H.W. (1951) Laboratory Study of Breakers. in Gravity Waves. United States Department of Commerce. National Bureau of Standards. Circular 521. S. 9-32
- Iwagaki, Y.; Tsuchiya, Y. u. Inoue, M. (1966) On the Effect of Wind on Wave Overtopping on Vertical Seawalls. Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto University. Vol. 16. Part 1. No. 105. S. 11-30
- Juhl, J. u. Sloth, P. (1994) Wave Overtopping of Breakwaters under Oblique Waves. Proceedings 24th Int. Conf. on Coastal Eng.. Kobe. S. 1182-1196
- Kajima, R. u. Sakakiyama, T. (1994) Review of Works using Crieipi Flume and present Work. Coastal Dynamics '94. S. 614-627
- Kikkawa, H.; Shi-Igai, H. u. Kono, T. (1968) Fundamental Study of Wave Overtopping on Levees. Coastal Engineering in Japan. Vol. 11. S. 107-115
- Kobayashi, N. u. Wurjanto, A. (1989) Wave Overtopping on Coastal Structures. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 115. No. 2. S.235-251
- Kolkman, P.A. (1984) Consideration about the Accuracy of Discharge Relations of Hydraulic Structures and the Use of Scale Models for their Calibration. Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures. Esslingen. S. 2.1-1 - 2.1-12
- Le Méhauté, B. (1976) Similitude in Coastal Engineering. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering. Vol. 102. No. WW3. S. 317-335
- Mansard, E.P.D. u. Funke, E.R. (1980) The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Square Method. Proc. 17th. Int. Conf. on Coastal Engineering. Sydney.
- McCowan, J. (1894) On the highest Wave of permanent Type. Philosophical Magazine 38. S. 351-358
- Miche, M. (1951) Mouvements Ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Annales des Ponts et Chaussées
- Miller, R.L. (1972) The Role of Surface Tension in Breaking Waves. Proceedings of the 13th Coastal Eng. Conference. Vancouver. S. 433-449
- Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (MELF) (1962) Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. Bericht der vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eingesetzten Ingenieur-Kommission. Die Küste. H. 1. S. 17-54
- Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1986) Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein - Fortschreibung 1986.
- Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt (1994) Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern
- Möller, J. (1999) Untersuchungen zum Wellenaufbau und Wellenüberlauf am historischen Deckwerk von Norderney. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (unveröffentlicht)

- Müller, D.R. (1995) Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren. Mitteilungen 137. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. S. 1-201
- Muttray, M.; Oumeraci, H. (2000) Böschungsbelastung durch Wellen: Vorhersage brechender Wellen. Wasserbaukolloquium der Technischen Universität Dresden. Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik. H. 18
- Nagai, S. u. Takada, A. (1970) Relations between the Run-up and Overtopping of Waves. Proceedings 13th Int. Conf. on Coastal Engineering. S. 1975-1992
- Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten - Referatsgruppe Wasserwirtschaft (1973) Generalplan Küstenschutz Niedersachsen
- Niemeyer, H.D.; Gärtner, J.; Kaiser, R.; Peters, K.H.; Schneider, O. (1995) The estimation of Design Wave Run-up on Sea Dykes in consideration of overtopping security by using Benchmarks of Flotsam. Proceedings COPEDEC. Rio de Janeiro. S. 1192-1203
- Oumeraci, H. (2001) „Küsteningenieurwesen“. Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Parey Buchverlag. Berlin (in Veröffentlichung)
- Oumeraci, H. u. Schüttrumpf, H. (1997) Hydrodynamische Belastung der Binnenböschung durch Wellenüberlauf. Zwischenbericht. DFG OU 1/ 2-1
- Oumeraci, H. u. Schüttrumpf, H. (1999a) Literature Review on Wave run-up and Wave run-down velocities. LWI-Bericht Nr. 840
- Oumeraci, H.; Schüttrumpf, H. u. Bleck, M. (1999b) Untersuchungen zur Ermittlung der mittleren Wellenüberlaufrate ohne Freibord bei Stromdeichen. LWI-Bericht Nr. 842
- Oumeraci, H.; Schüttrumpf, H. u. Bleck, M. (1999c) Wave Overtopping at Seadikes. Comparison of Physical Model Tests and Numerical Computations. LWI-Bericht Nr. 846
- Oumeraci, H.; Schüttrumpf, H.; Sauer, W.; Möller, J.; Droste, T. (2000a) Physical Model Tests on Wave Overtopping with Natural Sea States. LWI-Bericht Nr. 852
- Oumeraci, H.; Schüttrumpf, H.; Möller, J.; Kudella, M. (2000b) Large Scale Model Tests on Wave Overtopping. LWI-Bericht Nr. 858
- Owen, M.W. (1980) Design of Seawalls allowing for Wave Overtopping. Report No. EX 924. HR Wallingford
- Özhan, E. u. Yalçiner, A.C. (1990) Overtopping of Solitary Waves at Model Sea Dikes. Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng. S. 1487-1498
- Paape, A. (1960) Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves. Publication No. 23. Hydraulics Laboratory Delft.
- Pedersen, J. (1996) Wave Forces and Overtopping on Crown Walls of Rubble Mound Breakwaters - An Experimental Study. Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory. Aalborg University. Series Paper 12
- Pilarczyk, K.W. (1990) Design of Seawalls and Dikes - Including Overview of Revetments. In: Coastal Protection. Ed. Pilarczyk. Balkema. Rotterdam. S. 197-288
- Pilarczyk, K.W. (1994) Design of Coastal Structures - an overview -. International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction. Yokosuka. Japan. S. 617-639
- Richwien, W. u. Weissmann, R. (1995) Zur Standsicherheit von Deichbinnenböschungen bei Wellenüberlauf. Ergebnisbericht. Universität GH Essen. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Richwien, W. u. Weissmann, R. (1998) Quantifizierung der Sicherheitsreserven von Seedeichen bei Wellenüberlauf. Teil III. Universität GH Essen. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Richwien, W. u. Weissmann, R. (1999) Quantifizierung der Sicherheitsreserven von Seedeichen bei Wellenüberlauf. Teil IV (Abschlußbericht). Universität GH Essen. Institut für Grundbau und Bodenmechanik

- Rong-chung, H.* (1972) An Analytical Approach on the Estimation of the Quantity of Wave Overtopping. Journal of Civil and Hydraulic Engineering. Taiwan. S. 91-110
- Roos, A. u. Battjes, J.A.* (1976) Characteristics of Flow in Run-up of periodic waves. Proceedings 15th Int. Conf. on Coastal Engineering. Honolulu. S. 781-795
- Rouck, J. de; Troch, P.; Damme, L.V.; Eelen, B.; Schlütter, F.* (1998) Wave Run-up: Prototype versus Scale Models. Proceedings 26th Int. Conf. on Coastal Eng. Copenhagen. S. 1039-1052
- Sauer, W.* (2000) Experimentelle Untersuchungen zum Einfluß verschiedener Seegangsspektren auf den Wellenüberlauf. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (unveröffentlicht)
- Saville, T. Jr. u. Caldwell, J.M.* (1953) Experimental Study of Wave Overtopping on Shore Structures. Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention. Minneapolis. S. 261-269
- Saville, T. Jr.* (1955) Laboratory Data on Wave Run-up and Overtopping on Shore Structures. Beach Erosion Board. Techn. Memorandum 64
- Sawaragi, T.; Iwata, K. u. Kobayashi, M.* (1982) Condition and Probability of Occurrence of Resonance on steep Slopes of Coastal Structures. Coastal Engineering in Japan. Vol. 25. S. 75-90
- Schade, D.* (1991) Untersuchungen über das Wellenklima an einer Brandungsküste unter Einschluß der Richtungsstruktur des Seegangs, dargestellt am Beispiel der Insel Sylt. Mitteilungen Franzius-Institut für Wasserbau u. Küsteningenieurwesen. H. 71. S. 211-420
- Schiff, J.B.* (1972) Wave Run-up and Overtopping. Technical Advisory Committee on Protection against Inundation. Government Publishing Office. The Hague 1974
- Schüttrumpf, H. u. Oumeraci, H.* (1999) Wave Overtopping at Seadikes. 2nd Hydralab-Workshop. Hannover.
- Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H.; Kimura, K.; Hayakawa, T. u. Möller, J.* (1999) Wave Overtopping on a High Mound Composite Type Breakwater. Proceedings Coastal Structures 1999. Santander
- Schüttrumpf, H.; Troch, P.; De Rouck, J.; Oumeraci, H.* (2000) Prototype Run-up Velocities at Zeebrugge Breakwater. Proceedings 27th Int. Conf. on Coastal Eng. Sydney.
- Schüttrumpf, R.* (1973) Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen. H. 39.S. 1-217
- Schulz, K.P.* (1992) Maßstabseffekte beim Wellenaufwurf auf glatten und rauen Böschungen. Mitteilungen d. Leichtweiß-Instituts. H. 120
- Shen, M.C. & Meyer, R.E.* (1963a) Climb of a Bore on a beach. Part 2. Non-uniform slope. Journal of Fluid Mechanics. Vol. 16. S. 108-112
- Shen, M.C. & Meyer, R.E.* (1963b) Climb of a Bore on a beach. Part 3. Run-up. Journal of Fluid Mechanics. Vol. 16. S. 113-125
- Shi-Igai, H. u. Rong-Chung, H.* (1977) An analytical and computer study on wave overtopping. Coastal Engineering. Vol. 1. S. 221-241
- Sibul, O.* (1955) Flow over Reefs and Structures by Wave Action. Transactions. American Geophysical Union. Vol. 36. No. 1. S. 61-69
- Sloth, P. u. Juhl, J.* (1995) Individual Wave Overtopping Volumes for a Rubble Mound Breakwater. Int. Conf. On Coastal and Port Engineering in developing Countries. COPEDEC. S. 1294-1306
- Southgate, H.N.* (1996) Prediction of Wave Breaking Processes at the Coastline. In: Potential Flow of Fluids. (Ed. M. Rahman). Chapter 4. Advances in Fluid Mechanics. Vol. 6. Computational Mechanics Publications. Southampton. S. 109-148
- Szmytkiewicz, M.; Zeidler, R. u. Pilarczyk, K.* (1994) Irregular Wave Run-up on Composite Rough Slopes. Coastal Dynamics. S. 599-613
- Takahashi, T.; Shuto, N. u. Numata, A.* (1995) A Method of Estimation of Wave Run-up on Gentle-Slope Sea Walls Faced with Armour Units.

- Tautenhain, E.* (1981) Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus. Mitt. des Franzius-Instituts, H. 53, S.1-245
- Tominaga, Y.; Hashimoto, H.; Sakuma, N.* (1966) Wave Run-up and Overtopping on Coastal Dikes. Proceedings 10th Int. Conf. on Coastal Engineering. S. 364-381
- Umeyama, M.* (1993) Wave Overtopping on Vertical Boundary and Water-Surface Displacement. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 119. No. 3. S. 243-260
- Van der Meer, J.W. u. Klein Breteler, M.* (1990) Measurement and Computation of Wave induced velocities on a smooth slope. Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng.. S. 191-204
- Van der Meer, J.W. u. Janssen, J.P.F.M.* (1995) Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes. Published in: Wave Forces on inclined and Vertical Structures. Ed. Z.Demirbilek. S. 1-27
- Van der Meer, J.W., Tönjes, P. u. De Waal, J.P.* (1998) A code for dike height design and examination. Proceedings Int. Conf. on Coastlines, Structures and Breakwaters. (Ed. N.W.H. Allsop) Thomas Telford, London
- Van Gent, M.R.A.* (1995) Wave Interaction with permeable Coastal Structures. Dissertation. Delft University Press
- Van Gent, M.R.A.* (1999) Physical Model Investigations on Coastal Structures with Shallow Foreshores. 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra. Delft Hydraulics. Report H3608
- Verdonck, R.; Troch, P.; De Rouck, J.* (1998) Review of available Information. OPTICREST Task 1-report. MAS 03/545. University of Gent
- Waal, J.P. de u. Van der Meer, J.W.* (1992) Wave Runup and Overtopping on Coastal Structures. Proceedings 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering. Venedig. S. 1758-1771
- Waal, J.P. de; Tönjes, P. u. Van der Meer, J.W.* (1996) Wave Overtopping of Vertical Structures including Wind Effect. Proceedings 25th Int. Conf. on Coastal Engineering. Orlando. S. 2216-2229
- Waal, J.P. de* (1996) Evaluation of Wave Overtopping characteristics at six dikes in Germany. Delft Hydraulics. H 2119
- Wagner, H. u. Bürger, W.* (1973) Kennwerte zur Seedeichbemessung. Wasserwirtschaft und Wassertechnik (WWT). 23. Jahrgang. H. 6. S. 204-207
- Ward, D.L.; Zhang, J.; Wibner, C. u. Cinotto, C.M.* (1996) Wind Effects on Runup and Overtopping of Coastal Structures. Proceedings 25th Int. Conf. on Coastal Engineering. Orlando. S. 2206-2215
- Wassing, F.* (1957) Model Investigations of Wave Run-up carried out in the Netherlands during the last twenty Years. Proc. 6th Int. Conf. on Coastal Eng.. Gainesville. S.700-714
- Weggel, J.R.* (1976) Wave Overtopping Equation. Proceedings 15th Int. Conf. on Coastal Engineering. Honolulu. S. 2737-2755
- Weissmann, R.* (1999) Infiltration von Wellenüberlauf in Deichbinnenböschungen. Workshop Strömungen in Böden. Universität Essen. 14.10.1999
- Weissmann, R.* (2001) Dissertation. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Universität Essen.
- Wurjanto, A.* (1988) Numerical Simulation of wave overtopping on coastal Structures. Thesis at the Faculty of the University of Delaware. 162 S.
- Yamamoto, Y. u. Horikawa, K.* (1992) New Methods to evaluate Wave Run-up Height and Wave Overtopping Rate. Proceedings 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering. Venedig. S. 1734-1747
- Yuan, S.W.* (1955) Flow over Structures by Wave Action. Diskussion zu *Sibul* (1955). Transactions American Geophysical Union. Vol. 36. S. 69-71

## 7. Symbolverzeichnis

### (a) Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$a$	= Koeffizient (individuelle Wellenüberlaufmengen)	$[m^3]$
$a_0$	= dimensionsloser Koeffizient (Geschwindigkeiten)	$[-]$
$a_0^*$	= dimensionsloser Koeffizient (Geschwindigkeiten)	$[-]$
$A$	= Wellenaufbauhöhe	$[m]$
$b$	= dimensionsloser Koeffizient (mittlere Wellenüberlauftrate)	$[-]$
$B$	= Kronenbreite	$[m]$
$c$	= Wellenschnelligkeit	$[m/s]$
$c_1$	= dimensionsloser Koeffizient (Wellenaufbau)	$[-]$
$c_2$	= dimensionsloser Koeffizient (Schichtdicken)	$[-]$
$c_3$	= dimensionsloser Koeffizient (Schichtdicken / Krone)	$[-]$
$c_4$	= dimensionsloser Koeffizient (mittlere Wellenüberlauftrate)	$[-]$
$C_h$	= Chezy-Koeffizient	$[m^{1/2}/s]$
$d$	= Wassertiefe am Deichfuß	$[m]$
$E$	= Energiehöhe	$[Nm]$
$E_{kin}$	= kinetische Energie	$[Nm]$
$E_{pot}$	= potentielle Energie	$[Nm]$
$E_{Reibung}$	= Reibungsenergie	$[Nm]$
$f$	= Reibungsbeiwert	$[-]$
$Fr$	= FROUDE-Zahl	$[-]$
$g$	= Erdbeschleunigung (=9,81)	$[m/s^2]$
$GF$	= Groupiness-Faktor	$[-]$
$h$	= Schichtdicke	$[m]$
$h_{\ddot{u}}$	= Überfallhöhe	$[m]$
$H$	= Wellenhöhe	$[m]$
$H_{m0}$	= Wellenhöhe aus Wellenspektrum	$[m]$
$H_s$	= signifikante Wellenhöhe	$[m]$
$H_{1/3}$	= Mittelwert der 33% höchsten Wellenhöhen	$[m]$
$k_f$	= Durchlässigkeitskoeffizient	$[m/s]$
$k_{\ddot{u}}$	= Überfallbeiwert	$[-]$
$k_1, k_2$	= Beiwerte (Geschwindigkeiten / Binnenböschung)	$[-]$
$k_3, k_4$	= Beiwerte (Schichtdicken / Binnenböschung)	$[-]$
$k^*$	= Reibungsbeiwert	$[-]$
$L$	= Wellenlänge	$[m]$
$m$	= Neigung der Binnenböschung	$[-]$

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$m_g$	= Masse	[kg]
$M$	= Meßsignal	[-]
$n$	= Neigung der Außenböschung	[-]
$N$	= Anzahl	[-]
$N_L$	= Maßstabsfaktor	[-]
$p$	= Druck	[KN/m <sup>2</sup> ]
$P(V)$	= Unterschreitungswahrscheinlichkeit von V	[-]
$P_{ow}$	= Anzahl der überlaufenden Wellen	[-]
$q$	= mittlere Wellenüberlaufrate	[m <sup>3</sup> /(sm)]
$Q_*$	= dimensionslose Überlaufrate	[-]
$Q_0$	= Überlaufkoeffizient	[-]
$r$	= Regressionskoeffizient	[-]
$R_*$	= dimensionslose Freibordhöhe	[-]
$R_C$	= Freibordhöhe	[m]
$Re$	= REYNOLDS-Zahl	[-]
$RWS$	= Ruhewasserspiegel	[-]
$s$	= Koordinate (böschungsparell)	[m]
$t$	= Zeit, Phase	[s]
$t_b$	= Eintrittszeit eines Ereignisses	[s]
$t_E$	= Endzeitpunkt eines Ereignisses	[s]
$t_{max}$	= Zeitpunkt des Ereignismaximums	[s]
$t_{ref}$	= Referenzbereich	[s]
$T$	= Wellenperiode	[s]
$T_{01}$	= mittlere Wellenperiode aus Wellenspektrum	[s]
$T_P$	= Peakperiode	[s]
$u$	= horizontale Orbitalgeschwindigkeit	[m/s]
$U$	= tiefenintegrierte Geschwindigkeit	[m/s]
$U_{10}$	= Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe	[m/s]
$v$	= Geschwindigkeit	[m/s]
$V$	= Überlaufvolumen	[m <sup>3</sup> /m]
$We$	= WEBER-Zahl	[-]
$x$	= horizontale Koordinate	[m]
$x_*$	= Restauflauflänge	[m]
$z$	= vertikale Koordinate	[m]
$z_{auf}$	= Aufschlagpunkt der brechenden Welle	[m]
$z_d$	= Wellenablaufhöhe	[m]



Symbol	Bezeichnung	Einheit
$z_K$	= Kronenhöhe des Deiches	[m]
$z_\sigma$	= Erhöhung des Wellenauflaufes durch Oberflächenspannung $\sigma_0$	[m]

**(b) Griechische Symbole**

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$\alpha$	= Böschungswinkel der Außenböschung	[°]
$\alpha_K$	= Auflaufbeiwert	[-]
$\alpha_p$	= Phillips-Konstante	[-]
$\beta$	= Böschungswinkel der Binnenböschung	[°]
$\gamma$	= Peaküberhöhungsfaktor	[-]
$\gamma_\theta$	= Korrekturbeiwert für schrägen Wellenangriff	[-]
$\gamma_f$	= Reduktionsfaktor für Böschungsrauheit	[-]
$\eta$	= Wasserspiegelauslenkung	[m]
$\theta$	= Wellenangriffswinkel	[°]
$\mu$	= Überfallbeiwert	[-]
$\nu$	= kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
$\xi$	= Brecherkennzahl	[-]
$\xi_{sd}$	= Brecherkennzahl am Deichfuß	[-]
$\xi_{gr}$	= Grenzbrecherkennzahl	[-]
$\rho_w$	= Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	= Standardabweichung	[-]
$\sigma_0$	= Oberflächenspannung	[N/m]
$\sigma_a$	= Formfaktor zur Beschreibung der vorderen Peakbreite	[-]
$\sigma_b$	= Formfaktor zur Beschreibung der hinteren Peakbreite	[-]
$\sigma'$	= Variationskoeffizient	[-]
$\tau_0$	= Wandschubspannung	[N/m <sup>2</sup> ]
$\chi_r$	= Reflexionskoeffizient	[-]
$\omega$	= Kreisgeschwindigkeit	[1/s]

**(c) Häufig verwendete Indices**

0	=	Tiefwasser
A	=	Deichaußenböschung
b	=	Brechpunkt
B	=	Deichbinnenböschung
exp.	=	experimentell
K	=	Deichkrone
m	=	Mittelwert
max	=	Maximum
num.	=	numerisch

## **Anlagenverzeichnis**

<b>Anlage A</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	(7 Seiten)
-----------------	-----------------------	------------

- Konstruktion der Modellböschung
- Aufbau der Waage
- An- und Aufsicht der untersuchten Deichböschungen
- Fotos von Modellversuchen

<b>Anlage B</b>	<b>Versuchsprogramm</b>	(20 Seiten)
-----------------	-------------------------	-------------

- Dimensionsanalyse
- gemessene Wellenhöhen und Wellenperioden für alle Versuche
- mittlere Wellenüberlaufzeiten
- Brechertypen

**Anlage A**

**„Versuchsaufbau“**

## Anlage A-1

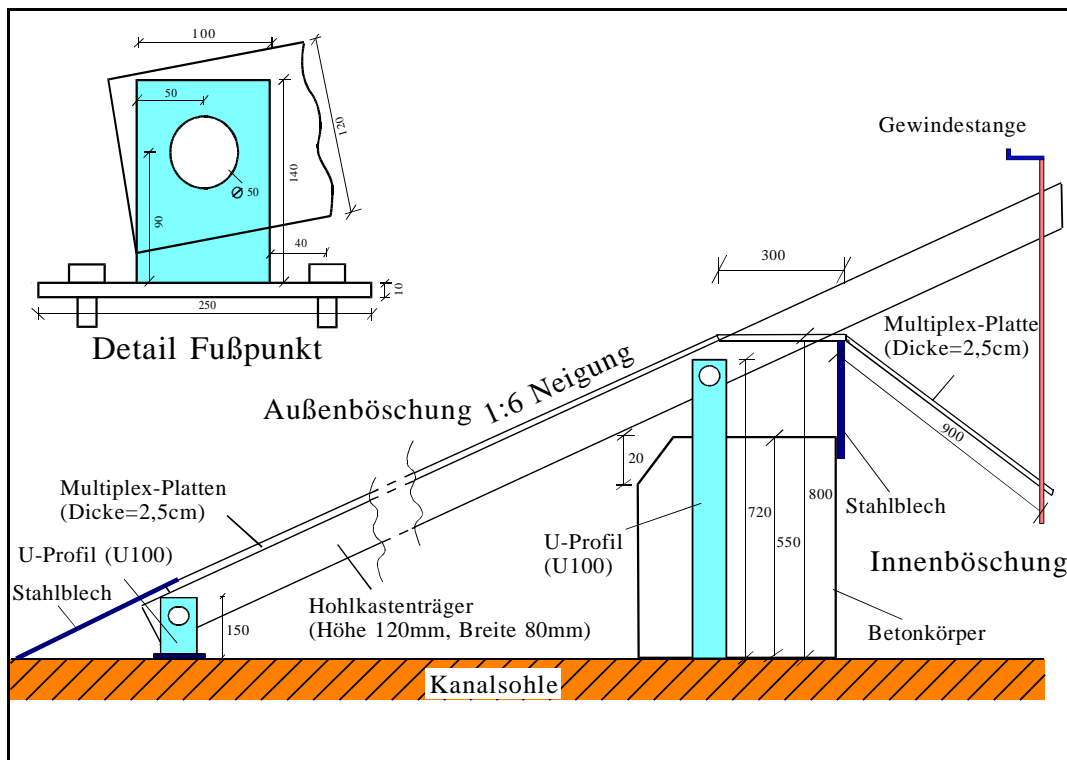


Abb. A.1: Unterkonstruktion des Deiches am Beispiel einer 1:6 Neigung

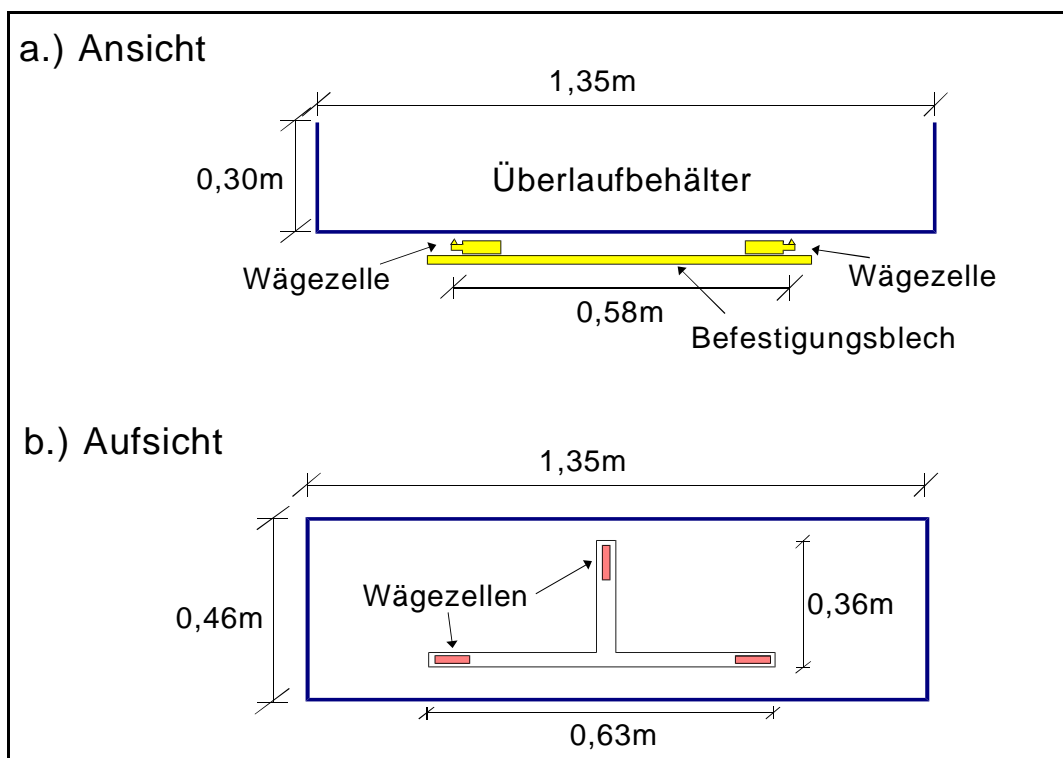
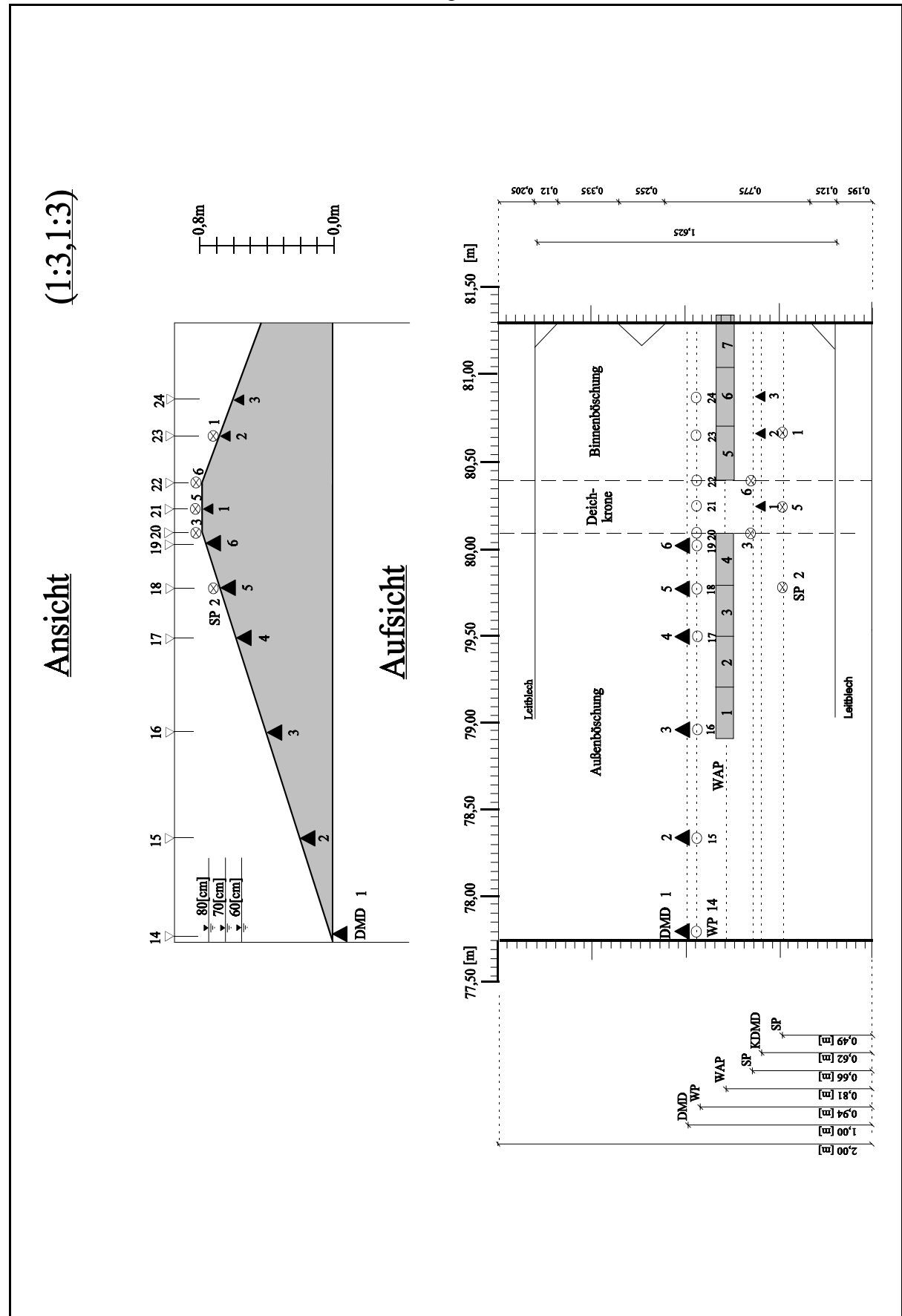


Abb. A.2: Aufbau der Waage zur Wägung des Wellenüberlaufs



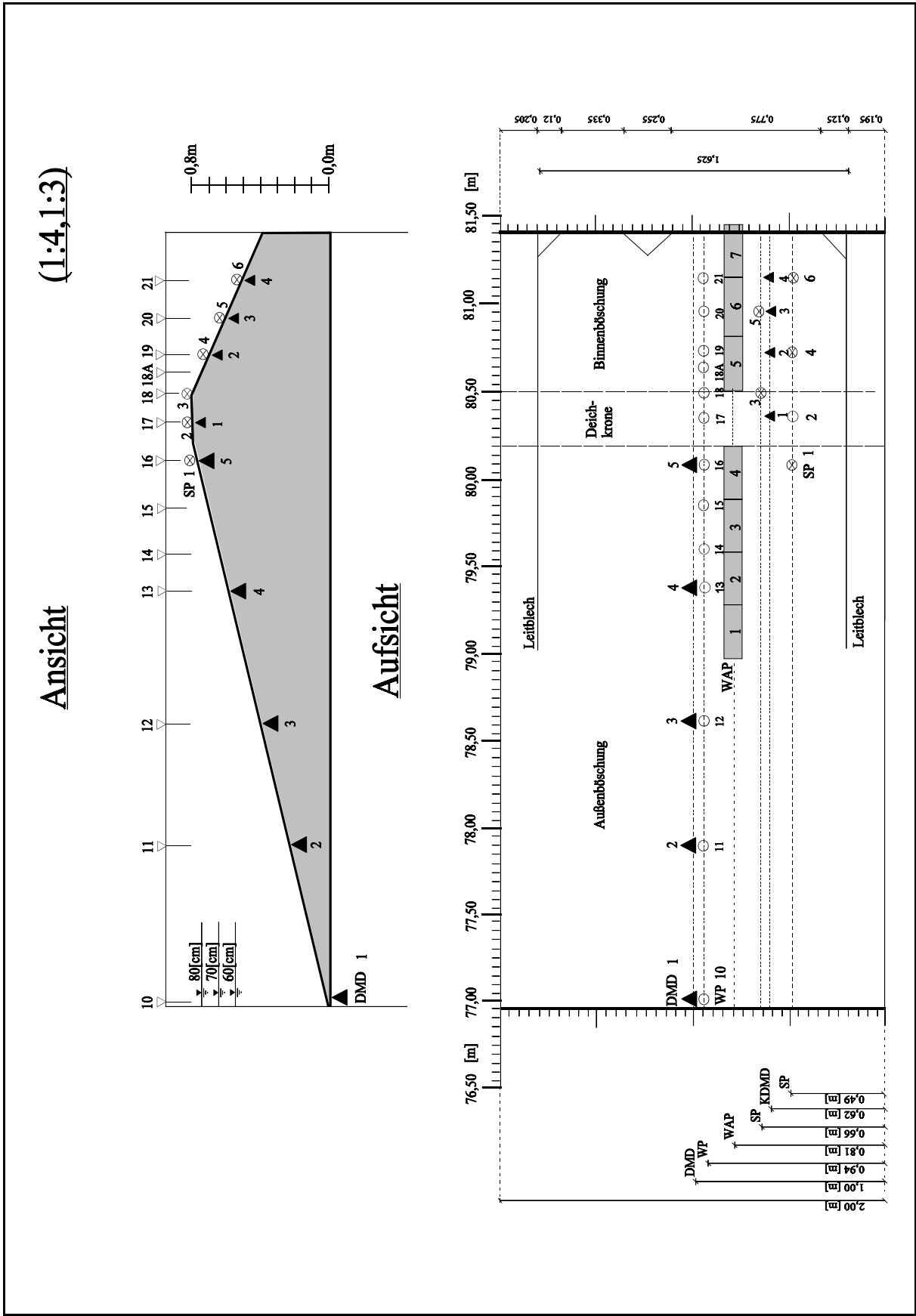


Abb. A.4: Aufsicht 1:4 Deich mit Anordnung aller Meßgeräte

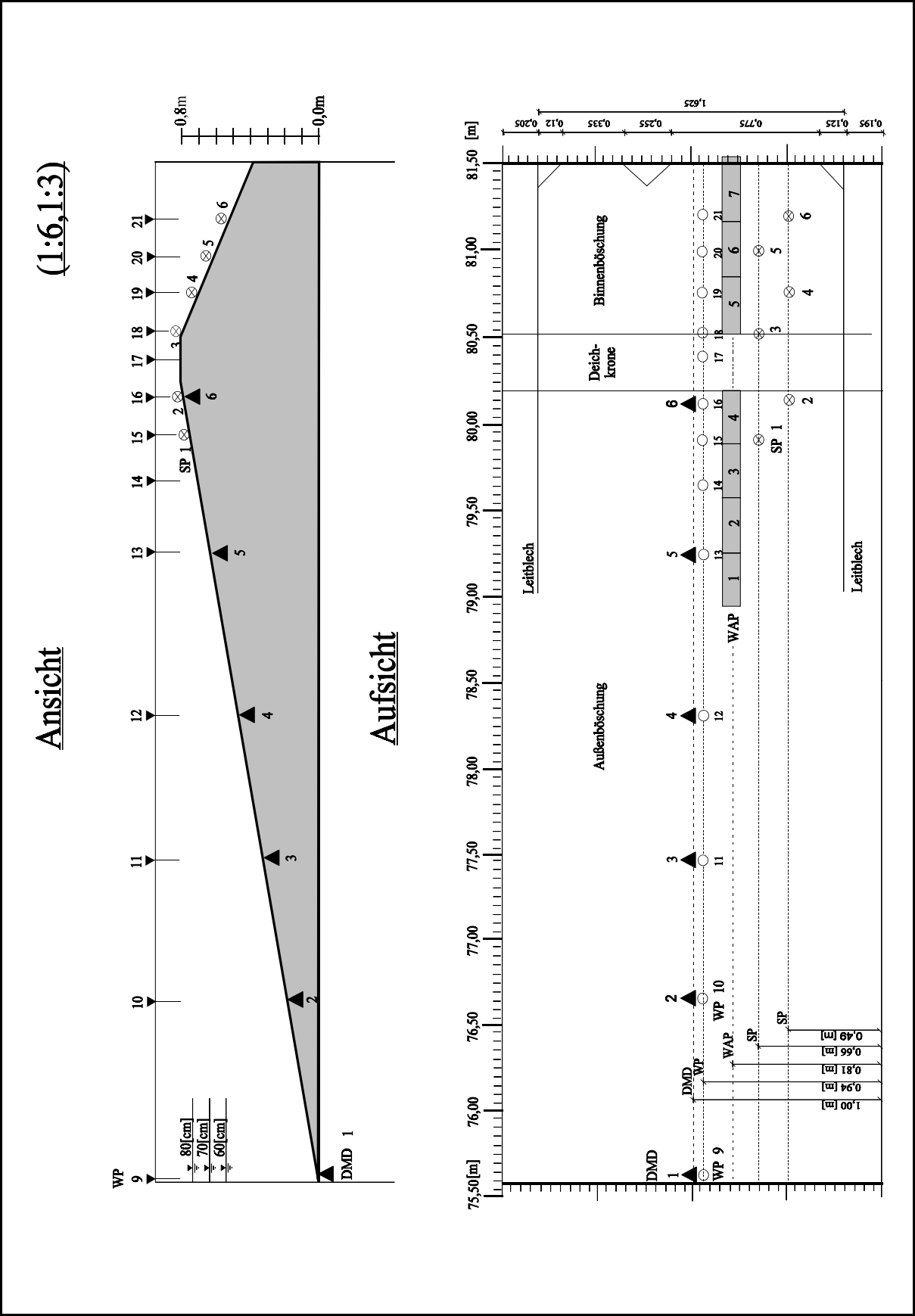


Abb. A.5: Aufsicht 1:6 Deich mit Anordnung aller Meßgeräte



Anlage A-5

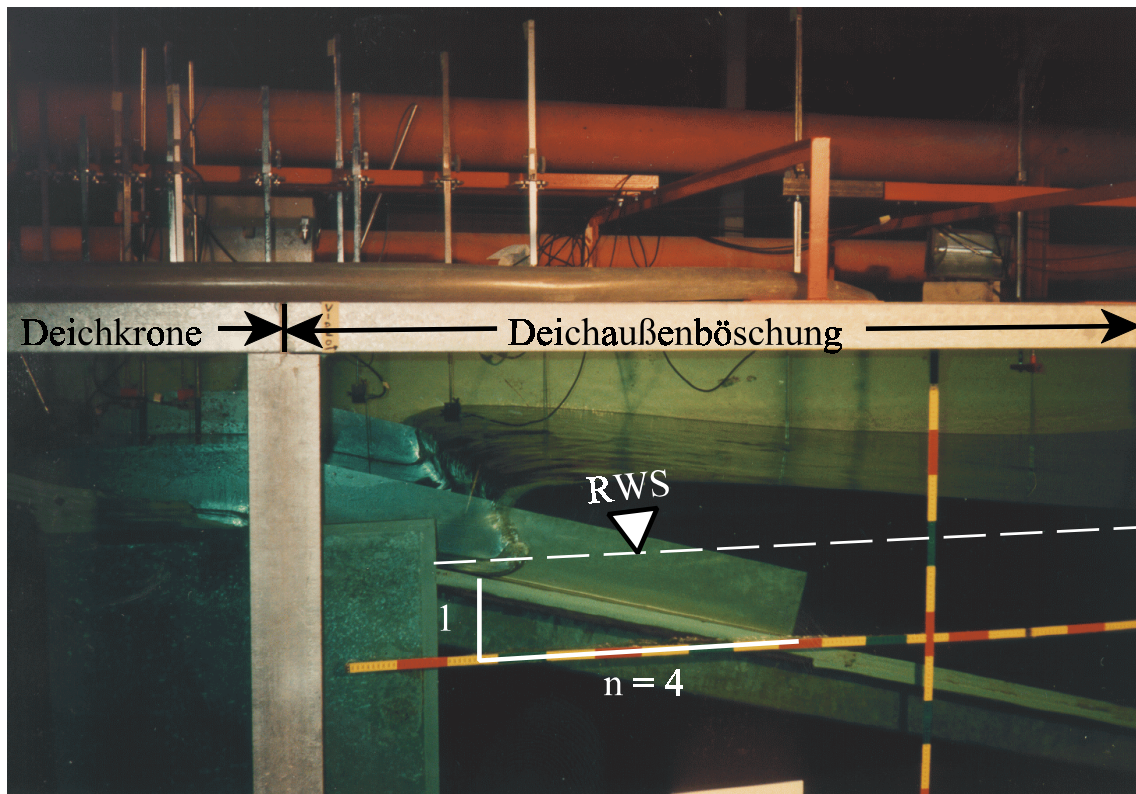


Abb. A.6: Brechende Welle auf der Deichaußenböschung

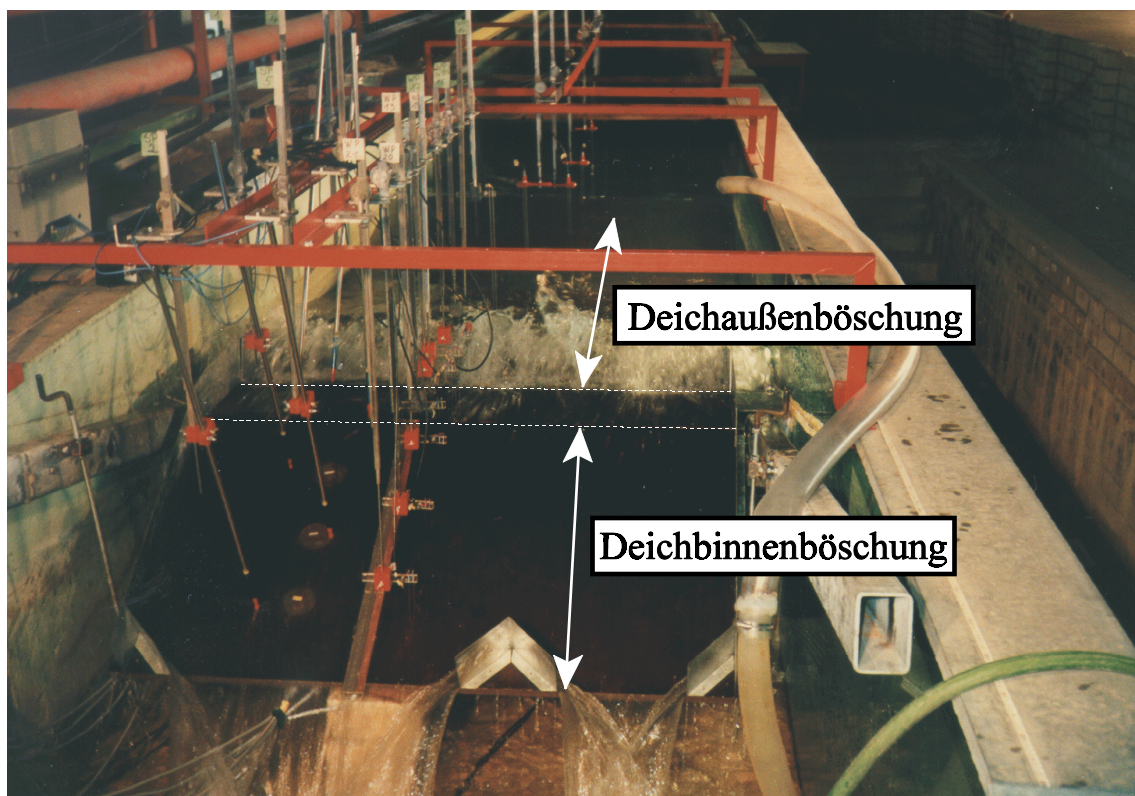


Abb. A.7: Brechende Welle auf Deichaußenböschung (Blick vom Kanalende)



Anlage A-6

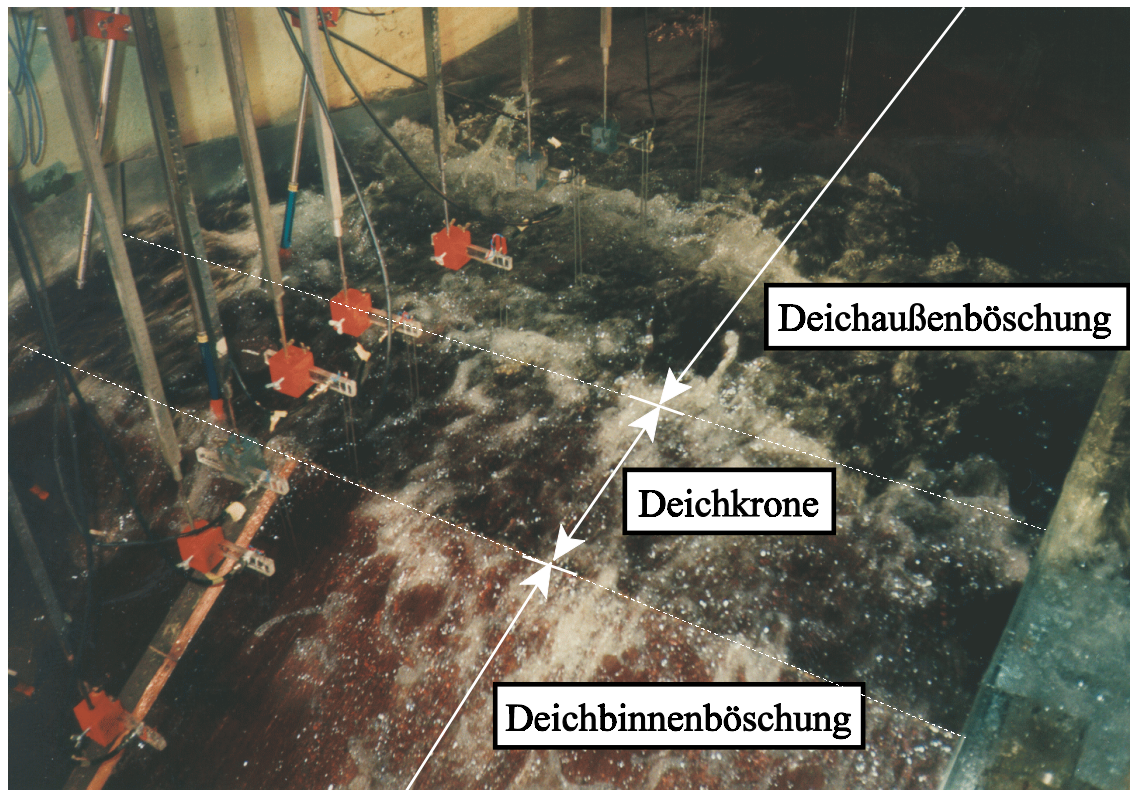


Abb. A.8: Wellenüberlauf auf der Deichkrone

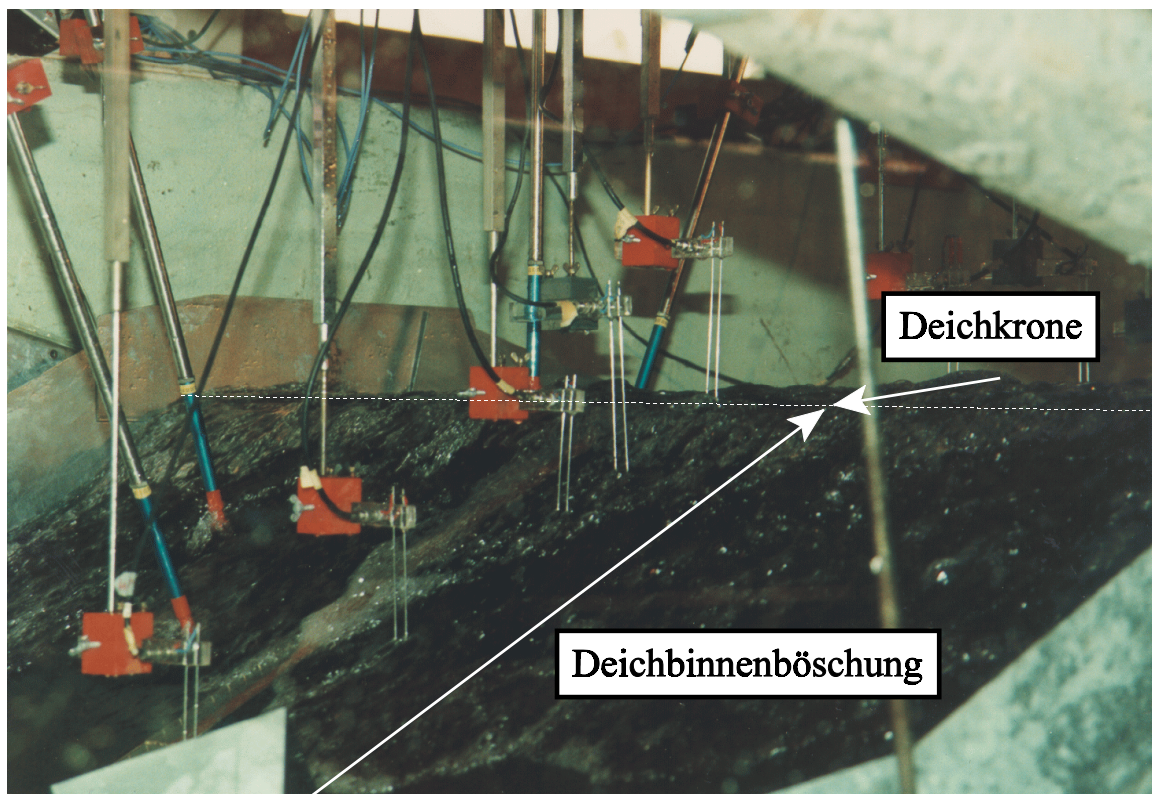


Abb. A.9: Übergang des Wellenüberlaufschwalls von der Deichkrone auf die Deichbinnenböschung



## Anlage A-7

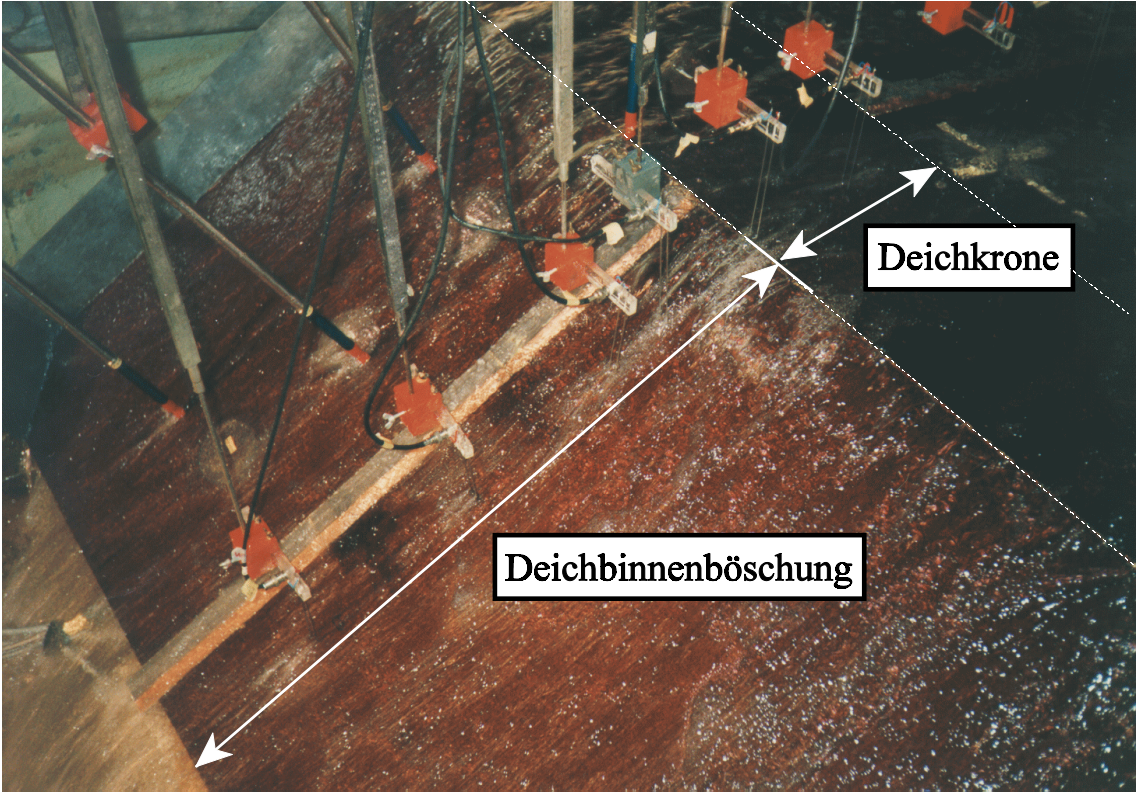
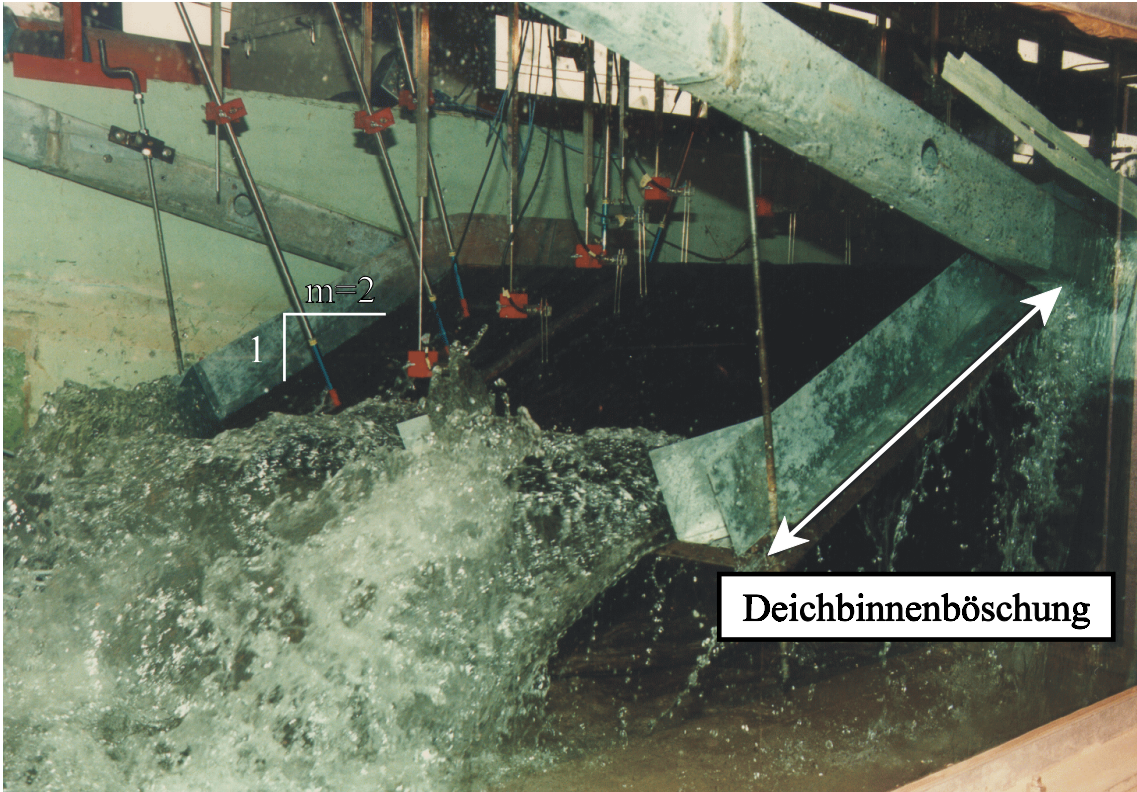


Abb. A.10:    Wellenüberlauf auf der Deichbinnenböschung



**Abb. A.11:** Wellenüberlauf am Ende der Deichbinnenböschung

## **Anlage B**

# **„Dimensionsanalyse und Versuchsprogramm“**

## Anlage B-1

### Dimensionsanalyse

Für die Planung des detaillierten Versuchsprogramms in den Anlagen B-2 bis B-21 wird eine Dimensionsanalyse nach dem  $\Pi$ -Theorem von *Buckingham* durchgeführt. Hier sollen die in Abschnitt 2.5.1 identifizierten maßgebenden Basisvariablen zu dimensionslosen  $\Pi$ -Größen zusammengefaßt werden. Die Strömungsgrößen des Wellenaufbaus stellen in diesem Zusammenhang die abhängigen Variablen und die Bauwerks- und Wellenparameter die unabhängigen Variablen dar.

$$v_A = f(H, T, d, R_C, n, g) \quad (\text{B.1a})$$

$$h_A = f(H, T, d, R_C, n, g) \quad (\text{B.1b})$$

mit:	$v_A$	=	Auflaufgeschwindigkeit [m/s]
	$h_A$	=	Schichtdicke [m]
	$H$	=	Wellenhöhe am Deichfuß [m]
	$T$	=	Wellenperiode [s]
	$d$	=	Wassertiefe am Deichfuß [m]
	$R_C$	=	Freibordhöhe (vertikaler Abstand zum RWS) [m]
	$n$	=	Neigung der Außenböschung 1:n = $\tan \alpha$ [-]
	$g$	=	Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s <sup>2</sup> ]

Aus Gl.(B.1) kann folgende Dimensionsmatrix gebildet werden,

	abhängige Parameter		unabhängige Parameter					
Einheit	$v_A$	$h_A$	$H$	$T$	$d$	$R_C$	$\tan \alpha$	$g$
[m]	1	1	1	0			0	
	-1	0	0	1	0	0	[0]	-2
[kg]	0	0	0	0	0	0	0	0

aus der dann fünf  $\Pi$ -Größen ermittelt werden:

$$\frac{v_A}{\left( \frac{\pi \cdot H}{T} \right)} = f \left( \tan \alpha, \frac{H}{L_0}, \frac{R_C}{H}, \frac{d}{H} \right) \quad (\text{B.2a})$$

$$\frac{h_A}{\sqrt{H \cdot L_0}} = f \left( \tan \alpha, \frac{H}{L_0}, \frac{R_C}{H}, \frac{d}{H} \right) \quad (\text{B.2b})$$

## Anlage B-2

Die abhängigen Größen in Gl. (B.2) sind:

$$\frac{v_A}{\left(\frac{\pi \cdot H}{T}\right)} = \text{Verhältnis aus Auflaufgeschwindigkeit zur Kreisgeschwindigkeit am RWS. Dabei stellen H und T die Wellenhöhe am Deichfuß bzw. die Wellenperiode dar.}$$

$$\frac{h_A}{\sqrt{H \cdot L_0}} = \text{Verhältnis aus Schichtdicke h zu Auflauflänge } x_Z = \sqrt{H \cdot L_0}. \text{ Dabei stellen H und } L_0 \text{ die Wellenhöhe am Deichfuß bzw. die Wellenlänge im Tiefwasser dar.}$$

und die unabhängigen dimensionslosen Größen:

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \text{Deichneigung} = 1/n \\ H/L_0 &= \text{Wellensteilheit} \\ R_C/H &= \text{relative Freibordhöhe} \\ d/H &= \text{relative Wassertiefe mit } d = \text{Wassertiefe am Deichfuß} \end{aligned}$$

Deichneigung  $\tan \alpha$  und Wellensteilheit  $H/L_0$  können zur Brecherkennzahl  $\xi$  kombiniert werden, so daß folgt:

$$\frac{v_A}{\left(\frac{\pi \cdot H}{T}\right)} = f \left( \xi_d, \frac{R_C}{H}, \frac{d}{H} \right) \quad (\text{B.3a})$$

$$\frac{h_A}{\sqrt{H \cdot L_0}} = f \left( \xi_d, \frac{R_C}{H}, \frac{d}{H} \right) \quad (\text{B.3b})$$

Ein Vergleich mit den in Abschnitt 4.3 ermittelten Funktionen für Auflaufgeschwindigkeiten und Schichtdicken auf der Deichaußenböschung zeigt die Berücksichtigung der dimensionslosen  $\Pi$ -Größen in den theoretischen Ansätzen:

$$\frac{v_A(R_C)}{\left(\frac{\pi \cdot H}{T}\right)} = a_0^* \cdot \tan \alpha \cdot \sqrt{\xi_d^3 - \xi_d^2 \frac{R_C}{H}} \quad (4.20)$$

$$\frac{h_A}{\sqrt{H \cdot L_0}} = \frac{c_2^*}{n} \left( 1 - \frac{R_C}{H} \frac{1}{c_1 \xi_d} \right) \quad (4.11)$$

Weiterhin wurde in Abschnitt 3.3.3 gezeigt, daß die relative Wassertiefe  $d/H$  für  $d/H > 3,0$  einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Strömungsgrößen des Wellenaufbaus und Wellenüberlaufs ist und somit in den Gl. (4.11) bzw. (4.20) ebenfalls vernachlässigt werden darf.

In entsprechender Weise wurde die Dimensionsanalyse auch für Deichkrone und Deichbinnenböschung durchgeführt, um das Versuchsprogramm aufzustellen. Für die Deichbinnenböschung folgt als weitere dimensionslose  $\Pi$ -Größe die Neigung  $\tan \beta$ , während die Neigung der Deichkrone horizontal gehalten wurde. Aus Gründen einer Reduktion des Umfangs dieser Arbeit wird die Dimensionsanalyse für Deichkrone und Deichbinnenböschung hier nicht explizit dargestellt.

## Anlage B-3

### Versuchsprogramm

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q (Versuche) [l/(sm)]	q(ODIFLOCS) [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,076	2,51	0,98	1,62	S
2	0,076	3,25	1,73	1,64	C
3	0,077	4,25	1,68	1,18	R
4	0,075	6,02	3,32	5,65	R
5	0,109	1,50	kein Überlauf	0,07	S
6	0,116	1,96	1,00	1,34	S
7	0,117	2,45	2,32	2,95	S
8	0,119	3,15	5,79	1,94	S
9	0,121	4,15	8,59	0,24	C
10	0,147	1,46	1,00	0,18	S
11	0,155	1,96	3,33	2,94	S
12	0,158	2,45	4,66	4,54	S
13	0,164	3,16	11,06	1,29	S
14	0,184	1,46	1,10	0,61	S
15	0,196	1,95	6,01	5,65	S
16	0,209	2,44	8,79	7,26	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-4

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,75m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q (Versuche) [l/(sm)]	q (ODIFLOCS) [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,074	1,50	0,82	0,99	S
2	0,075	1,50	0,93	1,01	S
3	0,076	2,00	2,47	3,03	S
4	0,078	2,50	3,92	5,25	S
5	0,077	3,25	5,64	5,17	C
6	0,077	4,25	5,77	5,12	R
7	0,074	6,00	6,80	9,99	R
8	0,114	1,46	3,18	2,22	S
9	0,119	1,96	5,27	6,16	S
10	0,120	2,50	7,51	8,19	S
11	0,120	3,25	10,96	2,83	S
12	0,149	1,50	5,71	4,95	S
13	0,154	2,06	8,39	11,45	S
14	0,163	2,51	11,61	9,66	S
15	0,186	1,50	7,48	7,98	S
16	0,195	2,00	11,71	15,98	S
17	0,198	2,46	9,24	20,51	S
18	0,167	3,15	17,15	3,64	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher



## Anlage B-5

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,80m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q (Versuche) [l/(sm)]	q (ODIFLOCS) [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,073	1,50	7,28	7,98	S
2	0,078	1,50	7,00	8,51	S
3	0,079	1,50	8,30	8,62	S
4	0,081	2,00	8,44	11,36	S
5	0,082	2,50	11,82	13,10	S
6	0,080	3,23	14,68	14,42	C
7	0,108	4,24	16,38	6,44	R
8	0,118	1,49	12,86	12,69	S
9	0,123	2,00	15,06	17,68	S
10	0,170	2,49	22,35	30,58	S
11	0,172	1,49	16,62	19,15	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-6

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:4

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,069	2,44	0,52	S
2	0,069	3,17	1,10	C
3	0,069	4,14	0,89	R
4	0,068	5,89	2,22	R
5	0,103	1,96	0,72	S
6	0,103	1,95	0,73	S
7	0,107	2,44	2,37	S
8	0,107	3,18	4,19	S
9	0,109	4,05	6,56	R
10	0,136	1,43	0,52	S
11	0,141	1,91	2,71	S
12	0,146	2,39	3,57	S
13	0,151	3,09	9,49	S
14	0,174	1,43	0,88	S
15	0,181	1,91	4,81	S
16	0,188	2,39	6,58	S
17	0,072	2,34	0,57	S
18	0,073	3,05	1,29	C
19	0,072	4,00	1,27	R
20	0,070	5,62	2,72	R

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

## Anlage B-7

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:4

**Wassertiefe:** 0,75m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,073	1,50	0,79	S
2	0,074	2,00	2,38	S
3	0,077	2,50	3,59	S
4	0,076	3,25	5,31	C
5	0,076	4,25	5,78	R
6	0,073	6,00	6,66	R
7	0,112	1,47	2,91	S
8	0,113	2,00	5,34	S
9	0,118	2,50	7,56	S
10	0,117	3,24	10,77	S
11	0,119	4,25	12,80	C
12	0,146	1,50	5,38	S
13	0,151	2,01	8,77	S
14	0,160	2,50	11,18	S
15	0,186	1,46	6,91	S
16	0,196	1,96	12,84	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

## Anlage B-8

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:4

**Wassertiefe:** 0,80m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,080	1,46	7,42	S
2	0,082	1,95	9,43	S
3	0,083	2,44	11,38	S
4	0,121	1,43	9,21	S
5	0,126	1,90	15,21	S
6	0,159	1,43	13,16	S
7	0,199	2,44	17,36	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-9

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:5

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,080	2,39	0,66	S
2	0,080	3,08	1,78	C
3	0,080	4,05	2,25	R
4	0,076	5,88	3,38	R
5	0,120	1,90	1,30	S
6	0,120	2,37	2,32	S
7	0,122	3,16	5,55	S
8	0,124	4,15	7,89	C
9	0,150	1,45	0,62	S
10	0,156	1,92	3,20	S
11	0,166	2,44	6,25	S
12	0,169	3,16	10,54	S
13	0,186	1,46	1,72	S
14	0,196	1,95	6,38	S
15	0,210	2,43	8,94	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

Anlage B-10

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:5

**Wassertiefe:** 0,80m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,089	1,43	7,44	S
2	0,085	1,90	8,80	S
3	0,086	2,38	11,10	S
4	0,122	1,43	10,67	S
5	0,127	1,90	13,94	S
6	0,162	1,43	13,77	S
7	0,201	1,43	17,74	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-11

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:6

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,080	2,44	1,16	S
2	0,080	3,17	1,62	C
3	0,081	4,16	1,75	R
4	0,079	5,88	3,46	R
5	0,123	1,91	1,25	S
6	0,122	2,39	2,12	S
7	0,126	3,08	6,10	S
8	0,127	4,05	8,95	C
9	0,155	1,43	0,56	S
10	0,163	1,91	3,50	S
11	0,166	2,39	5,14	S
12	0,173	3,08	11,69	S
13	0,195	1,42	1,00	S
14	0,206	1,87	6,22	S
15	0,220	2,35	9,76	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-12

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** Wellenspektren

Versuch	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]	q (Versuche) [l/(sm)]	q (ODIFLOCS) [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,070	1,37	kein Überlauf	0,06	S
2	0,076	1,71	0,17	0,15	C
3	0,069	2,29	0,34	0,39	R
4	0,071	2,81	0,65	0,81	R
5	0,092	3,78	0,96	1,05	S
6	0,073	4,02	0,84	0,08	S
7	0,098	1,41	0,23	0,17	S
8	0,108	1,95	0,30	0,36	C
9	0,110	2,32	0,95	0,95	S
10	0,115	3,17	2,02	1,22	S
11	0,129	3,52	3,12	3,04	S
12	0,134	1,47	0,41	0,34	S
13	0,158	2,01	1,23	1,65	S
14	0,159	2,44	2,13	1,86	S
15	0,136	2,88	3,56	1,19	S
16	0,170	1,47	0,64	0,62	S
17	0,189	1,95	2,10	2,96	S
18	0,174	2,04	2,56	2,14	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher



# Anlage B-13

**Neigung der Außenböschung:** 1:6

**Neigung der Binnenböschung:** 1:4

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** Wellenspektren

Versuch	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,063	2,30	0,31	S
2	0,066	2,58	0,62	C
3	0,099	3,66	1,07	R
4	0,081	4,83	0,84	R
5	0,091	1,33	0,24	S
6	0,095	1,95	0,65	S
7	0,098	2,31	0,86	S
8	0,091	2,95	2,06	C
9	0,118	3,36	2,99	S
10	0,119	1,47	0,40	S
11	0,138	2,01	1,23	S
12	0,143	2,38	2,22	S
13	0,121	2,82	3,59	S
14	0,154	1,41	0,73	S
15	0,171	1,88	2,74	S
16	0,159	1,98	2,34	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-14

**Neigung der Außenböschung:** 1:4

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,074	1,46	kein Überlauf	S
2	0,075	1,96	2,08	S
3	0,079	2,44	1,98	S
4	0,079	3,17	0,88	R
5	0,079	4,16	1,18	R
6	0,078	5,70	2,12	R
7	0,114	1,43	1,28	S
8	0,119	1,91	5,02	S
9	0,119	2,38	7,21	S
10	0,123	3,08	7,51	C
11	0,122	4,14	7,04	R
12	0,123	4,89	6,75	R
13	0,148	1,46	3,13	S
14	0,157	1,90	7,02	S
15	0,162	2,39	11,82	S
16	0,170	3,09	13,83	C
17	0,189	1,43	6,13	S
18	0,204	1,91	12,39	S
19	0,214	2,38	16,73	S
20	0,106	1,46	0,90	S
21	0,111	1,96	4,56	S
22	0,115	2,43	6,79	S
23	0,117	3,17	6,10	C

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

Anlage B-15

**Neigung der Außenböschung:** 1:4

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,80m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,082	1,43	11,74	S
2	0,082	1,95	11,61	S
3	0,082	2,45	12,53	S
4	0,082	3,17	17,25	R
5	0,081	4,16	16,88	R
6	0,080	5,84	15,79	R
7	0,119	1,46	15,89	S
8	0,124	1,95	17,87	S
9	0,124	2,44	25,00	S
10	0,130	3,08	20,85	C
11	0,159	1,42	21,05	S
12	0,199	1,41	22,87	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-16

**Neigung der Außenböschung:** 1:4

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** Wellenspektren

Versuch	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,045	1,72	0,78	S
2	0,049	2,34	0,63	C
3	0,064	2,89	0,33	R
4	0,053	3,43	1,93	R
5	0,054	4,40	0,13	R
6	0,072	1,32	0,36	S
7	0,086	1,89	1,68	S
8	0,075	2,17	2,76	C
9	0,089	3,09	2,32	C
10	0,070	3,41	3,97	R
11	0,098	1,42	0,99	S
12	0,098	1,85	2,94	S
13	0,102	2,44	4,64	S
14	0,104	2,99	5,08	C
15	0,113	1,46	2,52	R
16	0,120	1,76	5,30	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

Anlage B-17

**Neigung der Außenböschung:** 1:4

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,80m

**Wellentyp:** Wellenspektren

Versuch	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,054	1,46	4,27	S
2	0,054	1,79	7,65	S
3	0,058	2,43	9,93	C
4	0,052	2,84	7,89	R
5	0,083	1,46	8,52	S
6	0,083	1,87	10,41	S
7	0,085	2,21	13,65	S
8	0,103	1,44	11,70	S
9	0,127	1,46	12,87	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-18

**Neigung der Außenböschung:** 1:3

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,076	1,46	2,19	S
2	0,075	1,50	2,33	S
3	0,076	1,50	2,16	S
4	0,080	1,95	3,17	S
5	0,080	2,45	1,10	R
6	0,081	3,17	1,83	R
7	0,098	4,19	1,83	R
8	0,065	4,50	1,64	R
9	0,115	1,47	5,36	S
10	0,120	1,95	9,07	S
11	0,121	2,45	8,20	C
12	0,132	3,27	n.a.	R
13	0,138	4,26	n.a.	R
14	0,162	1,50	0,61	S
15	0,174	1,96	12,04	S
16	0,182	2,45	15,28	S
17	0,186	3,18	13,84	C
18	0,207	1,46	11,32	S
19	0,219	1,95	17,12	S
20	0,240	2,45	21,51	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

Anlage B-19

**Neigung der Außenböschung:** 1:3

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,80m

**Wellentyp:** regelmäßige Wellen

Versuch	H [m]	T [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,077	1,50	11,52	S
2	0,079	2,00	15,55	S
3	0,081	2,51	16,31	R
4	0,078	3,18	16,37	R
5	0,108	1,47	17,36	S
6	0,115	1,96	19,93	S
7	0,132	1,47	21,05	S
8	0,149	1,47	23,70	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Anlage B-20

**Neigung der Außenböschung:** 1:3

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,70m

**Wellentyp:** Wellenspektren

Versuch	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]	q [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,041	1,30	n.a.	S
2	0,045	1,76	n.a.	S
3	0,050	2,20	n.a.	C
4	0,046	2,65	n.a.	R
5	0,050	3,61	n.a.	R
6	0,071	1,37	1,60	S
7	0,079	2,00	2,28	S
8	0,078	2,24	1,89	S
9	0,076	3,26	1,36	C
10	0,070	3,41	2,37	R
11	0,102	1,46	2,35	S
12	0,094	1,80	4,76	S
13	0,114	2,49	4,89	S
14	0,104	2,87	4,71	C
15	0,118	1,46	4,31	S
16	0,137	1,96	6,66	S
17	0,121	2,06	9,19	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher



Anlage B-21

**Neigung der Außenböschung:** 1:3

**Neigung der Binnenböschung:** 1:3

**Wassertiefe:** 0,80m

**Wellentyp:** Wellenspektren

Versuch	$H_s$ [m]	$T_m$ [s]	$q$ [l/(sm)]	Brechertyp
1	0,110	1,46	16,04	S
2	0,094	1,46	9,75	S
3	0,076	1,42	7,69	S

S = Sturzbrecher

C = Collapsing-Brecher

R = Reflexionsbrecher

# Lebenslauf

Holger Friedrich Rolf Schüttrumpf

Geburtsdatum: 13.01.1968  
Geburtsort: Seesen  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: verheiratet, 1 Kind

## Ausbildung:

1993 "Dipl.-Ing." in Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Braunschweig.  
1991 - 1992 Auslandstudium an der Ecole nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble (ENSHMG) (Frankreich)  
1987 - 1993 Bauingenieurstudium, Technische Universität Braunschweig  
1987 Abitur am Jacobsogymnasium in Seesen

## Beruflicher Werdegang:

seit 04/2001: Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg -, Referat K2 (Ästuarsysteme I)  
  
04/1993 - 03/2001: Wissenschaftlicher Assistent am Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung für Hydromechanik und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Braunschweig  
  
04/1992 bis 03/1993 Diplomarbeit und Praktikum am Laboratoire d'Hydraulique de France (LHF) in Grenoble, Frankreich  
  
12/1989 bis 10/1991 Wissenschaftliche Hilfskraft, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Abt. für Hydromechanik und Küsteningenieurwesen  
  
08/1989 bis 09/1989 Praktikum im "Baluchistan Minor Irrigation and Agricultural Development Project" in Quetta (Pakistan), HALCROW-ULG (Großbritannien)